



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**TEPLOTNÍ STÁRNUTÍ BEZOLOVNATÝCH  
NÍZKOTEPLNÝCH SPOJŮ**

THERMAL AGING OF LEAD-FREE LOW-TEMPERATURE JOINTS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Vojtěch Jansa**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Martin Adámek, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Vojtěch Jansa

**ID:** 125149

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Teplotní stárnutí bezolovnatých nízkoteplotních spojů

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií bezolovnatého pájení a testováním pájených spojů. Pomocí navrženého a realizovaného motivu otestujte pevnost pájeného spoje podrobeného stárnutí teplotním cyklováním u vybraných nízkoteplotních pájek. Zhodnoťte jednotlivé vlastnosti zkoumaných pájek.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 22.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Adámek, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je prověřit vlastnosti nízkoteplotních bezolovnatých pájek podrobených stárnutí teplotním cyklováním. V teoretické části jsou rozebrány druhy bezolovnatých pájek, pasty používané pro výrobu elektrických obvodů tlustovrstvou technologií a způsoby testování vlastností vytvořených pájených spojů. Praktická část se zabývá návrhem a výrobou testovacích substrátů pro testování vytvořených pájených spojů mezi SMD součástkou a keramickým substrátem. Pro testování byly vybrány dvě pájky s obsahem bismutu, za referenční byla zvolena SAC pájka. Po stárnutí teplotním cyklováním v intervalu teplot  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$  jsou zde vyhodnocena data získaná testováním mechanické pevnosti pájeného spoje zkouškou stříhem.

## **Klíčová slova**

Bezolovnaté pájky, nízkoteplotní bezolovnaté pájky, bismut, tlustá vrstva, stárnutí teplotním cyklováním, test stříhem.

## **Abstract**

The aim of this master's thesis is to investigate properties of lead-free low-temperature solders after thermal aging. The theoretical part is focused on various types of lead-free solders, pastes used for the manufacture of electrical circuits by thick-film technology and methods of testing the properties of the soldered joints. The practical part deals with the design and production of test substrates for testing the solder joints formed between the SMD component and the ceramic substrate. Two solder bismuth-containing solder was selected for testing, the SAC solder was selected as the reference. After aging with temperature cycling from  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the data obtained by testing the mechanical strength of the solder joint by the shear test is evaluated.

## **Keywords**

Lead solder, low temperature lead-free solder, bismuth, thick layer, thermal aging, shear test.

### **Bibliografická citace:**

JANSA, V. *Teplotní stárnutí bezolovnatých nízkoteplotních spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Adámek, Ph.D..

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Teplotní stárnutí bezolovnatých nízkoteplotních spojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: **21. května 2018**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **21. května 2018**

.....  
podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné  
infrastruktuře

vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# Obsah

Úvod .....	1
1 Bezolovnaté pájení .....	2
1.1 Bezolovnaté pájky .....	2
1.1.1 Vliv jednotlivých příměsí na vlastnosti pájky .....	3
1.1.2 Pájka Sn/Ag/Cu.....	4
1.1.3 Pájka Sn/Cu.....	4
1.1.4 Pájka Sn/Ag .....	4
1.1.5 Pájka Sn/Bi .....	4
1.1.6 Pájka Sn/In.....	5
1.1.7 Pájka Sn/Sb.....	5
1.2 Tavidla.....	5
2 Pasty a jejich využití v elektronice.....	7
2.1 Pasty pro tlustovrstvou technologii .....	7
2.2 Pájecí pasty.....	8
2.2.1 Složení pájecí pasty .....	9
3 Spolehlivost pájeného spoje .....	10
3.1 Stárnutí pájeného spoje .....	10
4 Mechanické testování pájeného spoje .....	12
4.1 Zkouška stříhem .....	12
5 Praktická část - realizace testovacích substrátů .....	14
5.1 Tisk motivů a osazení součástek .....	14
5.2 Pájení osazených substrátů.....	20
5.3 Podmínky teplotního stárnutí .....	23
5.4 Podmínky testování pevnosti pájených spojů .....	25
6 Praktická část - Presentace získaných výsledků .....	26
6.1 Naměřené hodnoty rezistivity pájených spojů .....	26
6.2 Vzhled a mikrovýbrusy spojů .....	27
6.3 Test pevnosti spojů zkouškou stříhem .....	30
7 Závěr .....	36
Literatura.....	37
Seznam.příloh.....	38

## Seznam symbolů a zkratek

Ag	stříbro
Bi	bismut
Cu	měď
DPS	deska plošných spojů
μm	mikrometr
Ge	germanium
HIO	hybridní integrovaný obvod
IMC	intermetalická vrstva
In	indium
Pb	olovo
RuO <sub>2</sub>	oxid rutheničitý
Sb	antimon
SMD	Surface Mount Device (součástka pro povrchovou montáž)
Sn	cín
SPI	Solder Paste Inspection (kontrola pájecí pasty)
TCE	koeficient teplotní roztažnosti
Ω	Ohm
°C	stupeň Celsia



# Seznam obrázků

Obr. 2.1: Podélný teplotní profil pro výpal tlustých vrstev [8].....	8
Obr. 3.1: Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ [2]	
a) ve vrstvě se objevují trhliny, .....	
b) vrstva roste, trhlín přibývá a zvětšují se,	
c) vrstva a trhliny jsou tak velké, že může dojít k nefunkčnosti spoje .....	11
Obr. 3.2: Závislost tloušťky IMC na teplotě a čase[12] .....	11
Obr. 4.1: Zarovnání stříhové hlavy dle [15][16].....	13
Obr. 4.2: Nastavení výšky stříhové hlavy dle [15][16].....	13
Obr. 5.1: Návrh motivu testovací destičky s rozmístěním součástek .....	14
Obr. 5.2: Fotografie použitého sítotiskového poloautomatu Aurel C880.....	15
Obr. 5.3: Návrh motivu vodivé pasty .....	15
Obr. 5.4: Fotografie vytvořené a vypálené vodivé vrstvy .....	15
Obr. 5.5: Fotografie vytvořené šablony .....	16
Obr. 5.6: Návrh motivu pájecí pasty .....	16
Obr. 5.7: Fotografie použitých vah Sartorius .....	17
Obr. 5.8: Množství nanesené pájecí pasty na jednotlivých testovacích substrátech.....	18
Obr. 5.9: Fotografie použitého ručního SMT manipulátoru M01 .....	19
Obr. 5.10: Substrát s natisknutou pájecí pastou.....	20
Obr. 5.11: Osazený substrát .....	20
Obr. 5.12: Detail osazených součástek - nezapájené .....	20
Obr. 5.13: Přetavovací profil použitý pro bismutové pájky .....	21
Obr. 5.14: Přetavovací profil použitý pro SAC305 pájku .....	22
Obr. 5.15: Porovnání použitých přetavovacích profilů.....	22
Obr. 5.16: Použitá teplotní komora CTS T-40-25 .....	23
Obr. 5.17: Profil použitého teplotního cyklování .....	24
Obr. 5.18: Fotografie způsobu uložení testovaných substrátů v teplotní komoře .....	24
Obr. 5.19: Zařízení DAGE PC2400 .....	25
Obr. 6.1: Graf závislosti rezistivity pájených spojů na počtu teplotních cyklů .....	26
Obr. 6.2: Pájka SAC - 0 cyklů .....	27
Obr. 6.3: Pájka Sn/Bi/Ag - 0 cyklů .....	27

Obr. 6.4: Vzhled pájených spojů po 200 a 400 cyklech .....	28
Obr. 6.5: Degradace bismutových pájek po 600 cyklech .....	29
Obr. 6.6: Koroze bismutové pájky [17] .....	29
Obr. 6.7: Mikrovýbrusy spojů pájky Sn/Bi/Ag.....	30
Obr. 6.8: Mikrovýbrus spoje pájky Sn/Bi po 400 cyklech .....	30
Obr. 6.9: Fotografie utržených pájecích plošek bismutových pájek.....	31
Obr. 6.10: Průměrná hodnota pevnosti pájených spojů součástek o velikosti 1206.....	32
Obr. 6.11: Průměrná hodnota pevnosti pájených spojů součástek o velikosti 0805.....	34
Obr. 6.12: Průměrná hodnota pevnosti pájených spojů součástek o velikosti 0603.....	35

## Seznam tabulek

Tab. 1.1: Přehled teplot tavení a využití používaných bezolovnatých pájek [3] .....	2
Tab. 1.2: Vlastnosti vybraných příměsí v pájce [4] [5] .....	3
Tab. 1.3: Rozdělení tavidel dle ČSN EN ISO 9454-1 [2].....	6
Tab. 1.4: Rozdělení tavidel dle ANSI J-STD-004 [2] .....	6
Tab. 2.1: Jmenovitá velikost částic a jejich zastoupení v hmotnostních procentech dle ANSI J-STD-005[9] .....	9
Tab. 5.1: Seznam pájek vybraných pro testování a jejich základní vlastnosti.....	17
Tab. 5.2: Tabulka množství nanesené pájecí pasty .....	18
Tab. 6.1: Průměrné hodnoty naměřené rezistivity pájených spojů. ....	26
Tab. 6.2: Přehled poškození jednotlivých substrátů po 600 cyklech .....	28
Tab. 6.3: Souhrnné výsledky statistické analýzy dat - Studentův t-test .....	31
Tab. 6.4: Průměrné hodnoty pevnosti pájeného spoje v závislosti na počtu teplotních cyklů - součástky 1206 .....	32
Tab. 6.5: Průměrné hodnoty pevnosti pájeného spoje v závislosti na počtu teplotních cyklů - součástky 0805 .....	34
Tab. 6.6: Průměrné hodnoty pevnosti pájeného spoje v závislosti na počtu teplotních cyklů - součástky 0603 .....	35

# ÚVOD

V důsledku uplatňování normy RoHS 2011/65/EU [1] vydané Evropskou unií, zakazující používání vybraných nebezpečných látek k 1.7.2006, bylo nutné přejít z léty prověřené olovnaté pájky na bezolovnaté pájecí slitiny. Nové slitiny jsou stále založeny na cínu s dalšími příměsemi. Jsou charakterizovány vynikající pevností a tažností, ale bohužel mají vyšší tendenci k oxidaci a vyznačují se horší smáčivostí a vyšší agresivitou. Potřebují také vyšší teploty k přetavení. To v kombinaci s používáním stále menších součástek a jejich vyšší hustotě klade vyšší nároky na celkové zvládnutí pájecího procesu.

Problémem bezolovnatých pájek je nedostatečně dlouhá doba používání, aby byly známy relevantní poznatky o dlouhodobé spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů. Proto byla udělena v článku 2 normy 2011/65/EU výjimka ze zákazu používání olovnatých pájek pro aplikace, kde je vyžadována nejvyšší možná spolehlivost, jako je kosmonautika, vojenský průmysl a v lékařství např. zdravotní implantáty[1].

V oblasti spotřební elektroniky je dále kladen důraz na krátkou dobu od návrhu po zavedení do sériové výroby. Zkrácení doby testování pro odhalení možných nedostatků v pájecím procesu a vzájemné interakce stále většího počtu použitých druhů materiálů na stále menší ploše umožňuje mj. používání tepelného cyklování výrobků. Jedná se o vystavení výrobku teplotním cyklům, které mají za úkol vystavit testovanou sestavu zrychlenému stárnutí a teplotnímu stresu umožňující rychlejší odhalení konstrukčních a materiálových nedostatků.

Tato diplomová práce se zabývá teorií bezolovnatého pájení, teorií pájení přetavením, stárnutí teplotním cyklováním a návrhem zkušebního obrazce na keramický substrát pro následné mechanické zkoušky pevnosti pájeného spoje. Zkušební obrazec byl navržen pro zkoušku pájeného spoje stříhem na zařízení DAGE PC2400.

# 1 BEZOLOVNATÉ PÁJENÍ

## 1.1 Bezolovnaté pájky

Hlavním problémem přechodu z olovnatých pájek na pájky bezolovnaté je vyšší cena a vyšší teploty tavení bezolovnatých pájek. Zatímco pájky Sn/Pb dosahují tekutého stavu při eutektické teplotě 183 °C, u převážné většiny bezolovnatých pájek je tento stav dosažitelný v rozmezí teplot 195-227 °C, v závislosti na jejich složení [2]. Příklady teplot tavení vybraných pájek jsou uvedeny v tab. 1.1 [3]. Vyšší teploty nutné pro přetavení pájky kladou větší nároky na tepelnou odolnost použitých součástek a také více namáhají samotnou DPS (desku plošných spojů). Dalším souvisejícím problémem je vyšší spotřeba energie spotřebované během pájení.

**Tab. 1.1:** Přehled teplot tavení a využití používaných bezolovnatých pájek [3]

Teplota tavení (°C)	Pájka	Využití v průmyslu	Společnost
227	Sn/Cu	spotřebitelský, telekomunikace	Panasonic
			Nortel
221	Sn/Ag		
217	Sn/Ag/Cu/Sb		
	Sn/In/Ag		
	Sn/Ag/Cu/Zn		
	Sn/Ag/Cu	automobilový	Panasonic
		telekomunikace	Nokia, Nortel, Panasonic, Toshiba
	Sn/Ag/Bi/Cu	vojenský, letecký	Panasonic
206-213	Sn/Ag/Bi/Ge	spotřebitelský	Sony
	Sn/Ag/Bi/X	spotřebitelský	Panasonic
	Sn/Ag/Bi	vojenský, letecký, spotřebitelský	Panasonic
			Hitachi
199	Sn/Zn	spotřebitelský	NEC, Panasonic, Toshiba
<180	Sn/Bi/Zn		
138	Sn/Bi		Panasonic

Samotný cín má nízkou teplotu tavení, dobrou smáčivost, je měkký a tvárný. Bohužel, díky těmto vlastnostem je i málo mechanicky odolný. Čistý cín je také velmi náchylný k cínovému moru, který vzniká při teplotách nižších než 13 °C. Právě pro

potlačení cínového moru a zlepšení mechanických vlastností se k cínu přidávají další prvky, které mechanickou odolnost zvyšují. Bohužel mají i nežádoucí vlastnosti jako je zhoršení smáčivosti. Kromě těchto záměrně přidaných příměsí může být pájka kontaminována i dalšími prvky během pájení z DPS (desky plošných spojů) nebo z vývodů součástky [4].

### 1.1.1 Vliv jednotlivých příměsí na vlastnosti pájky

Příměsi v pájkách mohou mít pozitivní i negativní vliv na kvalitu pájeného spoje. Výpis nejčastějších příměsí v pájce je uveden v tab. 1.2 [4] [5].

**Tab. 1.2:** Vlastnosti vybraných příměsí v pájce [4] [5]

PŘÍMĚŠ	VÝHODY	NEVÝHODY
Stříbro (Ag)	snižuje bod tání zlepšuje smáčivost zlepšuje pevnost	tvoří intermetalické sloučeniny způsobuje zrnitost a důlky v povrchu pájky
Bismut (Bi)	snižuje bod tání zlepšuje smáčivost	
Měď (Cu)	zvyšuje pevnost	zvyšuje teplotu tání zvyšuje zrnitost zvyšuje křehkost
Zinek (Zn)	snižuje bod tání nízká cena	zhoršuje smáčivost podporuje oxidaci
Antimon (Sb)	zvyšuje pevnost snižuje povrchové napětí	
Indium (In)	snižuje bod tání	
Nikl (Ni)	zabraňuje odsmáčení	tvoří intermetalické sloučeniny
Germanium (Ge)	zabraňuje oxidaci	

### 1.1.2 Pájka Sn/Ag/Cu

Jedna z nejpoužívanějších, pájka SAC305, obsahuje 96,5 % cínu, 0,3 % stříbra a 0,5 % mědi (Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5). Teplota tavení této pájky je 217–218 °C [6]. Používá se však i pájka s koncentrací stříbra v rozmezí od 3,0–4,7 % a s koncentrací mědi od 0,5–1,7 % [6].

Všechny SAC pájky umožňují pracovní teploty zařízení okolo 175 °C bez výrazných známek degradace pájeného spoje. Horší smáčivost měděného povrchu je kompenzována použitím tavidel s vyšší teplotou aktivace. Pro lepší smáčivost může být použita také dusíkatá ochranná atmosféra. SAC pájené spoje se vyznačují vysokou spolehlivostí a odolností proti únavě [4][6].

### 1.1.3 Pájka Sn/Cu

Používá se eutektická slitina Sn99,3/Cu0,7 s teplotou tavení 227 °C. Stejně jako předchozí slitina umožňuje vysoké pracovní teploty a je odolná vůči únavovým defektům [4][7].

Existuje například pájka Sn100Sb, která obsahuje navíc příměs niklu a antimonu. Tato slitina nevyžaduje dusíkatou ochrannou atmosféru, je méně agresivní vůči nerezové oceli a dalším materiálům pájecí lázně. Vykazuje výborné vlastnosti pro pájení vlnou [4][7].

### 1.1.4 Pájka Sn/Ag

Eutektický poměr pro tuto slitinu je Sn/Ag3,5 s teplotou tání 221 °C. Slitina má omezenou rozpustnost stříbra v cínu, čímž je odolnější vůči zhrubnutí než pájka Sn/Pb. Pro zlepšení struktury pájky při tuhnutí se do pájky někdy přidává i 1 % zinku. Slitina má dostatečnou pevnost a smáčivost pájených povrchů [4][6].

### 1.1.5 Pájka Sn/Bi

Slitina má velice nízkou teplotu tavení a to jen 139 °C (podle některé lit. 138 °C). Proto se používá pro pájení teplotně citlivých součástek. Eutektické složení je Sn42/Bi58. Pokud je slitina kontaminována olovem, bod tuhnutí sloučeniny Bi/Pb je jen 97 °C, to negativně ovlivňuje tepelné únavové vlastnosti, které jsou v případě nepřítomnosti olova lepší než u pájky Sn/Pb. Díky vysokému obsahu bismutu vykazuje malou pružnost a rychlou oxidaci na vzduchu [4][6].

Hlavní nevýhodou bismutu je, že je vedlejším produktem při těžbě olova. Pokud spotřeba olova klesá, je také méně bismutu a cena pájky se zvyšuje [4][6].

### 1.1.6 Pájka Sn/In

Teplota tání slitiny Sn48/In52 je 117 °C. Díky indiu se v pájce zlato rozpouští pomaleji než v Sn/Pb pájkách a je odolná proti oxidaci [4][6].

Nevýhodou je koroze ve vlhkém prostředí. Indium je poměrně měkký kov se sklony k tvorbě studených spojů [4][6].

### 1.1.7 Pájka Sn/Sb

Používá se slitina Sn95/Sb5 s teplotou tání 232–240 °C. To ji předurčuje k vysokoteplotním aplikacím. Antimon zvyšuje tvrdost a pevnost, ale pokud je jeho podíl ve slitině větší než 4 %, zhoršuje pevnost v tahu. Pokud použijeme tavidlo RMA (pryskyřičné mírně aktivované) bez ochranné atmosféry, je smáčivost mnohem lepší než u pájek Sn63/Pb37 a Sn96,5/Ag3,5 [6].

Antimon je podobně jako bismut vedlejší produkt při výrobě olova. Proto s sebou nese již zmíněné problémy s rostoucí cenou [6].

## 1.2 Tavidla

Tavidla (flux) jsou nedílnou součástí pájky a usnadňují pájení rychlejším smáčením povrchu kontaktu pájkou. Rozdělení tavidel podle ČSN EN ISO 9454-1 je uvedeno v tab. 1.3, rozdělení podle ANSI J-STD-004 v tab. 1.4.

Funkce tavidla [2]:

- odstraňuje nečistoty a oxidy z pájeného povrchu,
- chrání před oxidací pájené plochy až do ukončení pájení,
- snižuje povrchové napětí pájky, umožňuje její snadnější rozlítí,
- zlepšuje přenos tepla.

Složení tavidla [2]:

- tavidlový nosič (přírodní nebo syntetická pryskyřice, organická kyselina),
- aktivátor (kyseliny, které odstraňují oxidy kovů),
- rozpouštědlo (např. alkoholy, voda),
- aditiva (upravují vlastnosti tavidla – např. antishlukovací činidla).



**Tab. 1.3:** Rozdělení tavidel dle ČSN EN ISO 9454-1 [2]

Typ tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma tavidla
1. Pryskyřicové	1. kalafuna (přírodní pryskyřice) 2. bez kalafuny (syntetická pryskyřice)	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
2. Organické	1. rozpustné ve vodě 2. nerozpustné ve vodě	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
3. Anorganické	1. soli  2. kyseliny  3. zásady	1. NH <sub>4</sub> Cl 2. bez NH <sub>4</sub> Cl 1. kyselina fosforečná 2. jiné kyseliny 1. Aminy nebo amoniak	A tekuté B tuhé C pasta

**Tab. 1.4:** Rozdělení tavidel dle ANSI J-STD-004 [2]

Základ tavidla	Zkratka	Úroveň aktivace (% halidů)					
		L0 0	L1 do 0,5	M0 0	M1 0,5 – 2	H0 0	H1 nad 2
přírodní pryskyřice	ROSIN <b>RO</b>	A	B	C	D	E	F
syntetické pryskyřice	RESIN <b>RE</b>	G	H	I	J	K	L
organické kyseliny	ORGANIC <b>OR</b>	M	N	P	Q	R	S
anorganické kyseliny	INORGANIC <b>IR</b>	T	U	V	W	X	Y

Tavidla jsou porovnávána podle korozivních vlastností, podle vodivosti tavidla a tavidlových zbytků. Vhodně se také hodnotí smáčecí schopnosti tavidla v kombinaci s pájkou pomocí meniskografu.

## 2 PASTY A JEJICH VYUŽITÍ V ELEKTRONICE

Používané pasty byly rozděleny do kapitol na pasty pro tlustovrstvou technologii a na pájecí pasty.

### 2.1 Pasty pro tlustovrstvou technologii

Tlustovrstvá technologie je používána hlavně pro výrobu HIO (hybridních integrovaných obvodů) na keramický substrát. Hlavní výhodou technologie tlustých vrstev je nenáročnost na technologické vybavení. Protože se jedná o nevakuový proces, je realizace poměrně levná a rychlá.

Pasivní sítě (např. vodivý obrazec, rezistory) na substrátech jsou vytvářeny pomocí materiálů, které se dodávají ve formě past. Dodávané pasty mají tzv. tixotropní vlastnosti – s rostoucí třecí silou se snižuje viskozita pasty. To má za následek vyšší tekutost pasty při jejím nanášení a při odtrhávání síta nebo při sejmutí šablony ze substrátu. Poté, co třecí síla zanikne, se viskozita pasty vrátí na původní hodnotu. Každá pasta se skládá ze tří základních složek: funkční, tavivové a pojivové. Snahou je, aby všechny použité modifikátory upravující vlastnosti pasty byly odstraněny během přehřevu.

Vytvořené motivy musí být napřed zasušeny při teplotách 120-150 °C a poté se vypalují podle, pro pastu doporučeného, teplotního profilu při teplotách cca 800 °C (př. teplotního profilu je uveden na obr. 2.1). Z důvodu používání takto vysokých teplot se tlustovrstvá technologie realizuje většinou na keramice.

**Funkční složka**, většinou ve formě kuliček, určuje charakter pasty a je tvořena částicemi drahých kovů u vodivých materiálů nebo částicemi dielektrických a skelných frit u izolačních materiálů. U odporových materiálů je složení funkční složky závislé na použitém odporovém systému, jehož základ může tvořit směs drahých kovů (např. PdAg) nebo oxidy (např. RuO<sub>2</sub> - oxid rutheničitý). Velikost částic se pohybuje řádově v μm (mikrometr) a musí být dostatečně malá oproti velikosti ok síta [8].

**Tavivová složka** je tvořena skleněnou fritou, díky níž dochází k vytvoření vazby mezi funkční složkou a substrátem. Proto se používají pro tavivovou složku nízkotavná skla s teplotou měknutí již od 600 °C [8].

**Pojivová složka** obsažená v pastě zajišťuje její tiskové vlastnosti – viskozitu a tvoří ji organické látky jako např. terpeneol, butyldiglykolacetát apod. Tato složka se v průběhu tepelného zpracování odpaří a nepodílí se na konečné funkčnosti vrstvy [8].

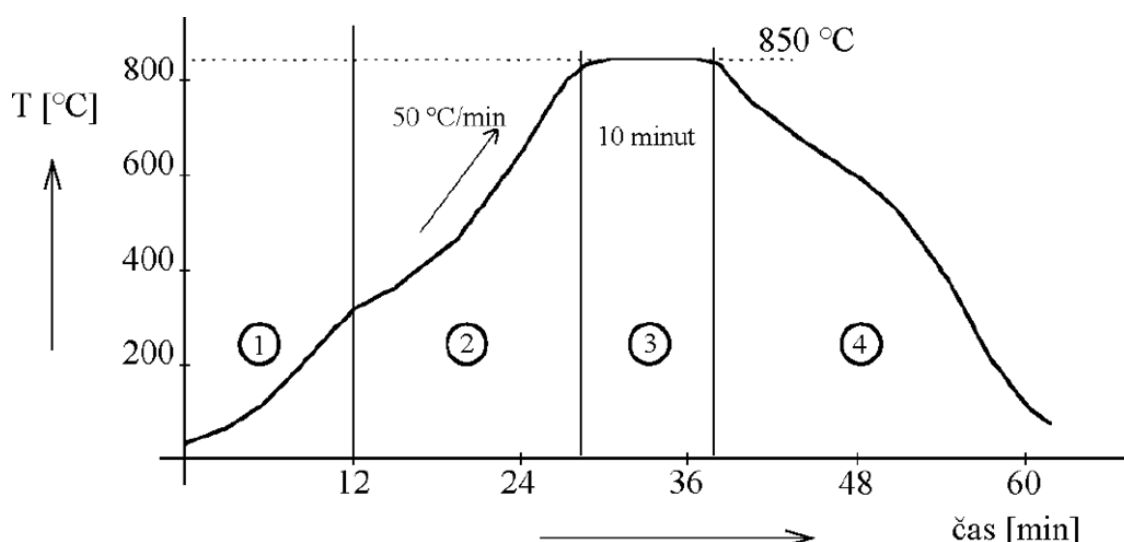
Pasty lze dále rozdělit podle jejich funkce na vodivé, odporové, dielektrické (izolační) a speciální.

**Vodivé pasty** využívají jako funkční složku drahé kovy (zlato - Au, palladium - Pd, platina - Pt, stříbro - Ag), především pro jejich stálost a netečnost vůči vlivům prostředí.

**Odporové pasty** využívají jako funkční složku různé směsi drahých kovů, které u některých systémů vytvářejí oxidy (např.  $\text{RuO}_2$  - oxid rutheničitý). Hodnota odporu je nastavována poměrem vodivé (kovové) části a tavivové (skelné) složky.

**Dielektrické pasty** tvoří materiály používané pro keramické kondenzátory (typ I nebo II) a u izolačních past různé typy skelných frit.

**Speciální pasty** – jedná se o další předem připravené funkční směsi. Tyto materiály se řadí do skupiny speciálních past, jako jsou např. termistorové, magnetické, luminiscenční, stínící a také pasty pro chemické senzory apod.



**Obr. 2.1:** Podélný teplotní profil pro výpal tlustých vrstev [8]

## 2.2 Pájecí pasty

Pájecí pasty slouží k vytvoření vodivého spoje na předem definovaných místech. Používají se hlavně pro kontaktování SMD součástek, ale je možno kontaktovat i součástky vývodové. Pasta se skládá z kuliček pájky o velikosti  $5\text{--}150\text{ }\mu\text{m}$  (podle typu a určení pasty), gelového tavidla a reologických modifikátorů upravujících tiskové vlastnosti past [2]. Tím je zajištěn ideální poměr pájky a tavidla pro vytvoření kvalitního pájeného spoje.

### 2.2.1 Složení pájecí pasty

**Prášková pájka** je hlavní složkou pájecí pasty. Skládá se převážně z kuliček pájky o definovaném průměru. Podle velikosti kuliček se pasty dělí do několika typů uvedených v tab. 2.1. Typ pájecí pasty se volí podle nejmenší apertury šablony a často se používá pravidlo 4-5 D, tj. do nejmenší apertury šablony by se mělo vejít jak na výšku, tak na šířku, 4-5 kuliček pájky o největším průměru[10]. Určujícím faktorem je nejen vzdálenost vývodů součástky, ale také zvolená technika tisku pasty [2].

**Tab. 2.1:** Jmenovitá velikost částic a jejich zastoupení v hmotnostních procentech dle ANSI J-STD-005[9]

Kategorie	Žádná větší než	Méně než 1 % větší než	80% minimálně mezi	10% maximálně menší než
Typ 1	160 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$	150 - 75 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Typ 2	80 $\mu\text{m}$	75 $\mu\text{m}$	75 - 45 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Typ 3	50 $\mu\text{m}$	45 $\mu\text{m}$	45 - 25 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Typ 4	40 $\mu\text{m}$	38 $\mu\text{m}$	38 - 20 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Typ 5	30 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	25 - 15 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$
Typ 6	20 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	15 - 5 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$

Pájecí charakteristiky pasty značně nepříznivě ovlivňují oxidy kovů, které v pastě vznikají zcela přirozeně stárnutím a nevhodným skladováním (pasty se musí skladovat v chladničkách). Oxidy kovů mají mnohem vyšší teploty tavení ( $\text{SnO}_2 > 1930^\circ\text{C}$ ,  $\text{PbO} > 890^\circ\text{C}$ ) než samotná pájka a vyskytují se tím ve větší míře, čím menší průměr zrn pájka obsahuje – oxiduje větší plocha pájky [2].

**Tavidlo** je druhou nejdůležitější složkou pájecí pasty. Má za úkol odstranit nečistoty a oxidy z pájeného spoje a urychlit smáčení, čímž pomáhá vytvořit spolehlivý pájený spoj. Používají se pastovitá tavidla na bázi přírodní pryskyřice (RO), syntetické pryskyřice (RE) a organických kyselin (OR) s různou úrovní aktivace. Tavidlo ve velké míře ovlivňuje vlastnosti pasty během tisku i po natisknutí[2].

**Reologické modifikátory** ovlivňují reologické vlastnosti pasty během tisku i po natisknutí. Zejména se jedná o snížení viskozity pasty při mechanickém namáhání (tisku) a následném zvýšení viskozity po natisknutí (tixotropnost pasty).

Dále je sledována i lepivost pájecí pasty, tj. schopnost fixovat osazené součástky na požadovaném místě během veškeré manipulace až do zapájení.

### 3 SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE

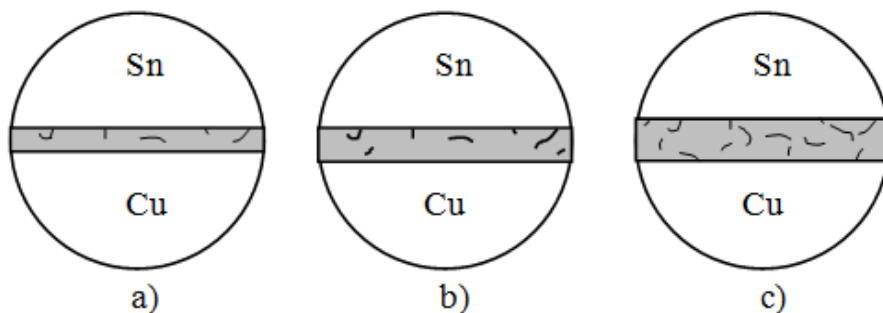
Spolehlivost může být posuzována z různých hledisek, avšak z funkčního hlediska rozhoduje životnost (vodivost) pájeného spoje. To je ovlivněno řadou faktorů, z nichž mezi ty nejzákladnější patří [3]:

- stárnutí materiálů,
- mechanické namáhání,
- teplotní namáhání.

#### 3.1 Stárnutí pájeného spoje

Pájený spoj je tvořen nejen samotnou pájkou (75 %), ale také kontaktní plochou substrátu (20 %) a vývodem součástky (5 %), přičemž během procesu reaktivního smáčení a následného roztékání pájky po povrchu je mezikovové rozhraní nahrazováno více či méně spojitou přechodovou tzv. intermetalickou vrstvou (IMC). Tato vrstva může mít podstatný vliv na spolehlivost a životnost výsledného pájeného spoje. Pochopení charakteristik IMC a jejich vývoj je tedy základní předpoklad pro porozumění vlastností pájených spojů. K formování intermetalické oblasti bezolovnatými slitinami cínu dochází procesy rozpouštění a difúze. Intermetalická zóna je tvořena intermetalickými slitinami  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , atd. (při použití SAC pájek vzniká intermetalická slitina  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ). Tato vrstva dosahuje tloušťky řádově v mikrometrech, ale může narůst až na několik desítek mikrometrů [3] [10] [11].

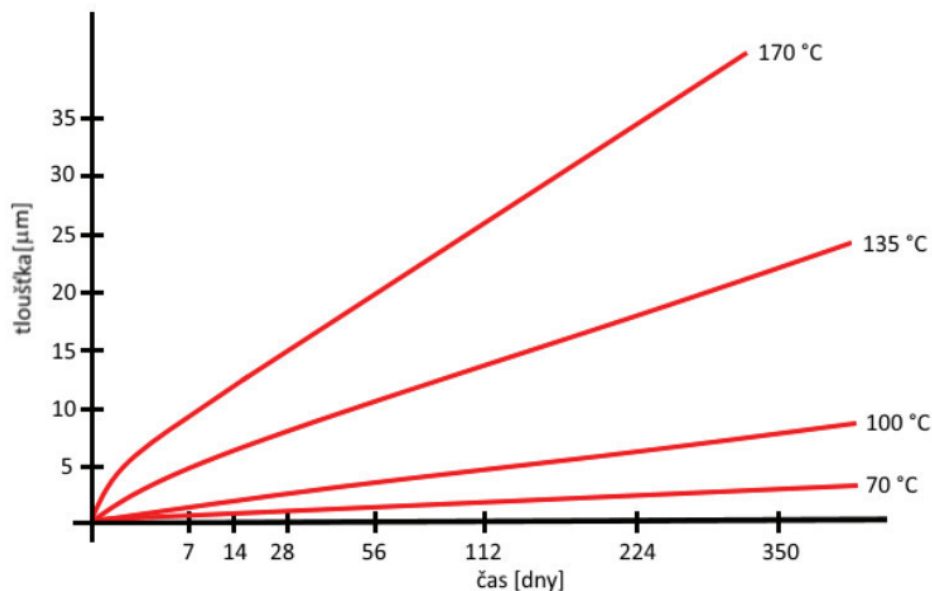
Protože se životnost spojů pohybuje v řádu několika let, provádí se tzv. zrychlené zkoušky. Jedná se o simulování pracovního režimu při zvýšené teplotě, tepelné cyklování nebo tepelné šoky, které mohou být doplněny zvýšenou relativní vlhkostí. Tyto podmínky urychlují stárnutí pájeného spoje – intermetalická vrstva narůstá rychleji, čímž se snižuje vodivost spoje a jeho mechanická pevnost, spoj degraduje a postupně ztratí funkčnost. Vrstvy IMC jsou obecně křehčí a k největšímu pnutí (vlivem rozdílného koeficientu teplotní roztažnosti (TCE) součástek, substrátu a pájky) dochází většinou na rozhraní pájky a pájecí plošky. Schematické zobrazení tohoto jevu je uvedeno na obr. 3.1[3][10].



**Obr. 3.1:** Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  [2]

- a) ve vrstvě se objevují trhliny,
- b) vrstva roste, trhlín přibývá a zvětšují se,
- c) vrstva a trhliny jsou tak velké, že může dojít k nefunkčnosti spoje

Difuzní vrstva potvrzuje vytvoření pájeného spoje, ale díky tomu, že s postupem času narůstá a zvětšuje svoji tloušťku, zvyšuje elektrický odpor spoje a může ho i mechanicky narušit. Nadměrný růst této vrstvy může být vyvolán v samotném počátku vzniku spoje při ohřevu (příliš vysoká teplota nebo dlouhá doba ohřevu), nebo následně ohřevem spoje v průběhu provozu [2]. Závislost tloušťky IMC na teplotě je uvedena na obr. 3.2[12].



**Obr. 3.2:** Závislost tloušťky IMC na teplotě a čase[12]

## 4 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ PÁJENÉHO SPOJE

Testování pájených spojů je mechanické, elektrické, optické a stárnutím materiálu, přičemž stárnutí materiálu bylo popsáno okrajově v předchozí kapitole. Tato kapitola bude z důvodu zadání práce zaměřena jen na mechanické testování.

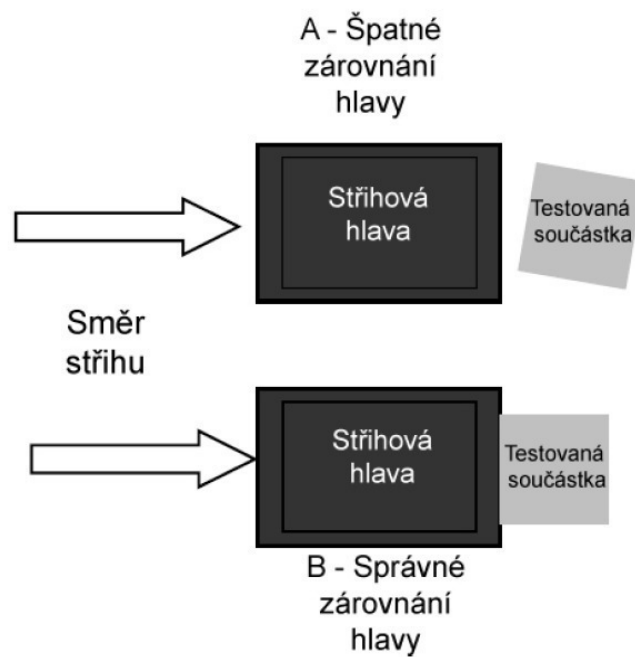
Metodikou provádění mechanických zkoušek se zabývá hlavně norma ČSN EN 62137 – 1 – (1–5). Toto testování pomáhá analyzovat mechanické vlastnosti pájených spojů. Poznání mechanických vlastností spojů nabývá na důležitosti v důsledku stále větší integrace (používání menších součástek a čipů) a tím i zmenšování vývodů a pájených spojů.

Mechanické zkoušky se používají pro znázornění deformace pájky v závislosti na čase, při působení vnějších zatěžovacích sil. Spoje se testují vibracemi, stříhem, tahem, krutem, ohybem, pádem atd. Pájené spoje jsou mechanicky omezené na rozhraní mezi substrátem a pájkou, protože substrát se deformuje pružně na rozdíl od pájky, která se deformuje nepružně [13]. Z důvodu rozsahu a zaměření této práce se bude kapitola blíže zabývat jen zkouškou stříhem.

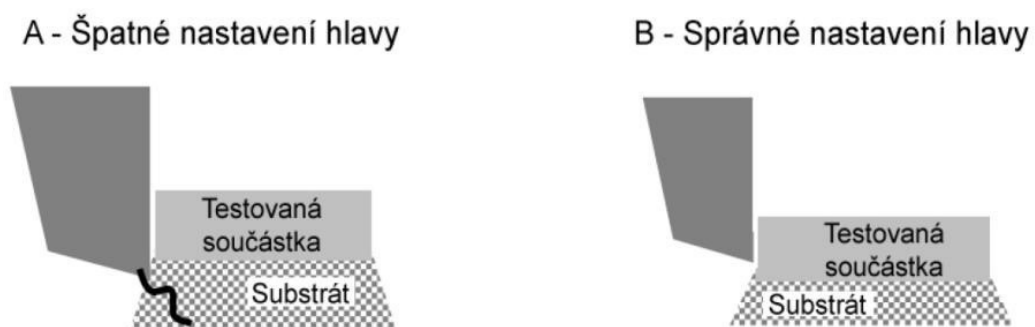
### 4.1 Zkouška stříhem

Jedná se o zkoušku, která je využívána pro testování pevnosti pájeného spoje, hodnocení stupně trhlin a poškození spoje. Podmínky zkoušky pevnosti ve smyku jsou uvedeny v normě ČSN EN 62137 – 1 – 2 a v normě ČSN EN 60749 – 19 jako zkouška pevnosti čipu stříhem. Bohužel tato metoda testování není vhodná pro všechny typy pouzder. Hodí se pouze pro testování součástek určených pro povrchovou montáž. Není vhodná pro vývodové součástky, QFP pouzdra (Quad Flat Package), pro flip – chip technologii a pro flexibilní substráty [13].

Metoda testování stříhem zkoumá sílu potřebnou pro utrnutí součástky ve spoji. Potřebná síla je závislá na pevnosti pájky, množství pájky a velikosti trhlin, které se v pájce vytvoří během přetavení. Testuje se většinou při pokojové teplotě, ale je možné testování provádět i při zvýšené teplotě nebo po teplotním cyklování [14]. Důležité pro správnost naměřené odtrhové síly je rovnoběžné nastavení trhací hlavy a trhané součástky (obr. 4.1). Pokud by trhací hlava nebyla rovnoběžně se součástkou, došlo by k předčasnému popraskání pájky a zaznamenání špatné hodnoty odtrhové síly. Stříhová hlava také nesmí být příliš vysoko nad substrátem, protože musí tlačit do  $\frac{3}{4}$  boční výšky součástky (obr. 4.2). Naopak, pokud by byla stříhová hlava umístěna tak nízko, až by se dotýkala substrátu, opět by to vedlo ke zkreslení výsledků. Velice důležité je také správné uchycení testovací DPS, protože deska se při testu nesmí posunout [15].



**Obr. 4.1:** Zárovnání střihové hlavy dle [15][16]



**Obr. 4.2:** Nastavení výšky střihové hlavy dle [15][16]



## 5 PRAKTICKÁ ČÁST - REALIZACE TESTOVACÍCH SUBSTRÁTŮ

V praktické části je uveden navržený testovací motiv určený pro realizaci na keramickou destičku o velikosti 2" × 2" palce (50,8 mm × 50,8 mm) a výroba testovacích substrátů pro testování pájených spojů SMD součástek různých velikostí.

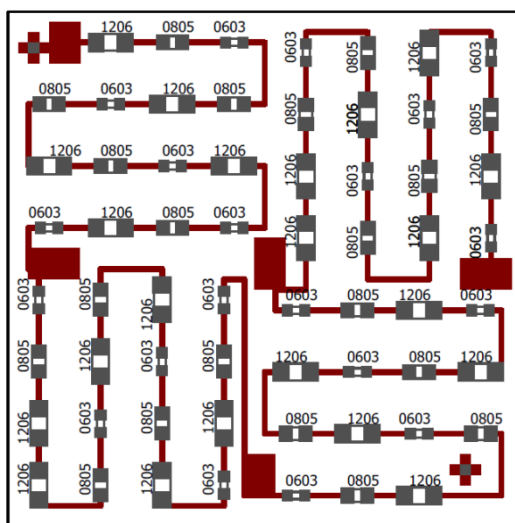
### 5.1 Tisk motivů a osazení součástek

Pro návrh použitého motivu byl využit program Eagle 8.4.1, který vyniká snadnou obsluhou a obsahuje všechny potřebné funkce i ve volně šiřitelné verzi.

Testovací motiv (obr. 5.1) je navržen na korundovou keramickou destičku ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o rozměrech 2" × 2" a tloušťce 0,635 mm od výrobce ELCERAM. Prostor je rozdělen na 4 kvadranty z důvodu snadnějšího, ale hlavně přesnějšího testování pevnosti pájeného spoje na zkušebním zařízení Dage PC2400. Při trhání součástek v pravé polovině destičky je axiální síla působící na upevňovací stolek pohlcována stavěcím šroubem. Zároveň je spodní polovina destičky snadněji přístupná, pokud je destička uchycena v testovacím zařízení.

Na každou testovací destičku bylo umístěno:

- 22 rezistorů velikosti 1206,
- 20 rezistorů velikosti 0805,
- 20 rezistorů velikosti 0603,
- 2 soutiskové značky,
- 4 kontaktní plochy pro měření vodivosti vzniklých pájených spojů.

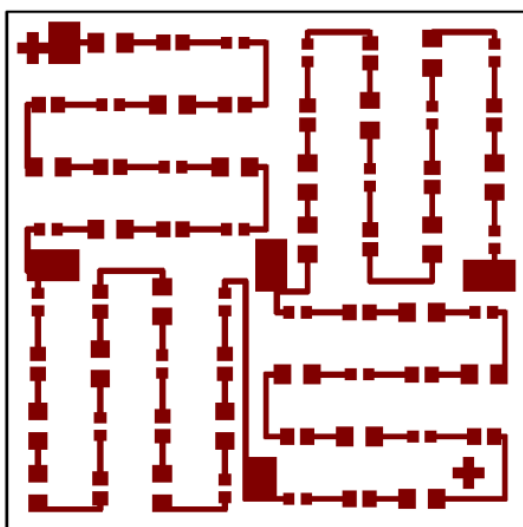


**Obr. 5.1:** Návrh motivu testovací destičky s rozmístěním součástek

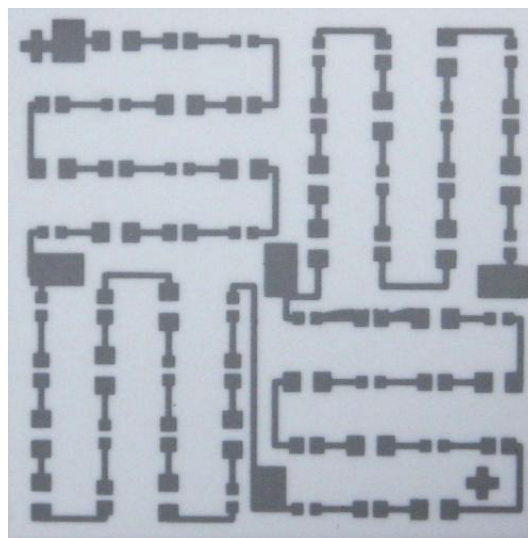
Vodivý obrazec byl vytvořen sítotiskem za využití sítotiskového poloautomatu Aurel C880 (obr. 5.2). Pro potřebu zhotovení síta byl exportován z návrhového programu Eagle motiv vodivé pasty (obr. 5.3). Fotografie vytvořeného a vypáleného vodivého motivu je uvedena na obr.5.4.



**Obr. 5.2:** Fotografie použitého sítotiskového poloautomatu Aurel C880



**Obr. 5.3:** Návrh motivu vodivé pasty

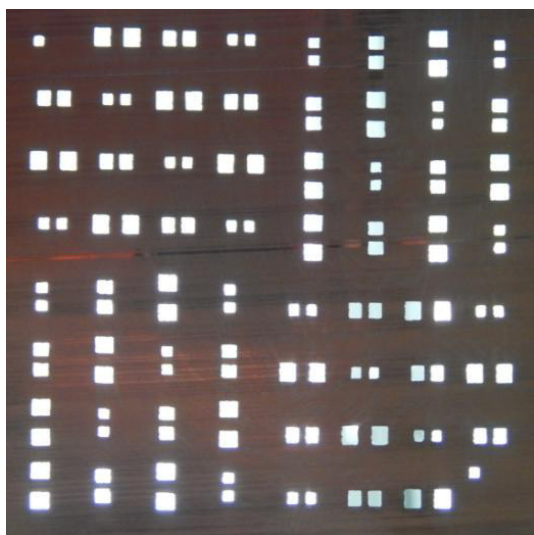


**Obr. 5.4:** Fotografie vytvořeného a vypáleného vodivé vrstvy

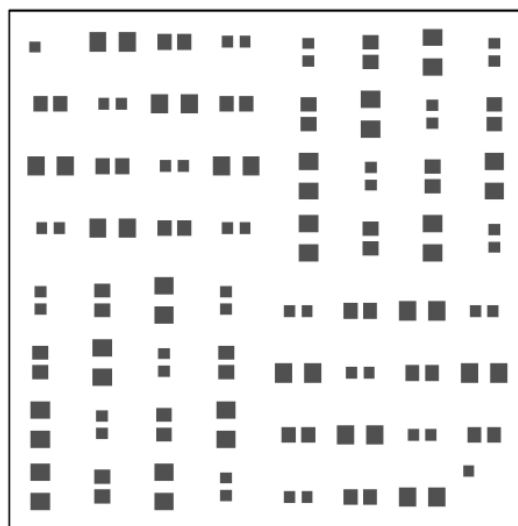
Po upevnění rámu se sítím bylo třeba nastavit parametry tisku, na kterých závisí výsledná kvalita natisknutého motivu. Pro přesné sesouhlasení soutiskových značek je stolek také vybaven mikrošrouby pro jemný posuv a rotaci v horizontální rovině.

Následoval leveling pasty (15 minut) a zasušení motivu (20 minut při teplotě 150 °C) byl proveden výpal v průběžné peci BTU podle profilu zadaného výrobcem pasty. Použita byla stříbro - palladiová pasta ESL 9695-G od výrobce ElectroScience.

Dalším krokem v realizaci testovacích substrátů je nanesení zkoumaných pájecích past. Nanesení pájecí pasty bylo provedeno na šablonovém poloautomatu Uniprint PM Go3V přes laserem vytvořenou šablonu (obr. 5.5) o tloušťce 150μm. Pro vytvoření šablony byl exportován obrazec vodivé pasty, který je uveden na obr. 5.6.



**Obr. 5.5:** Fotografie vytvořené šablony



**Obr. 5.6:** Návrh motivu pájecí pasty

Pro testování byly zvoleny 2 pájecí pasty s obsahem bismutu, které se vyznačují nízkou teplotou přetavení a jako referenční pájka byla zvolena pájka SAC 305 od firmy NEVO. Seznam zvolených pájecích past a jejich nejdůležitější vlastnosti jsou uvedeny v tab. 5.1. Teplota přetavení zkoumaných bismutových pájek je o 50 až 80 °C nižší, než teplota přetavení referenční pájky SAC305.

**Tab. 5.1:** Seznam pájek vybraných pro testování a jejich základní vlastnosti

pájka	výrobce	složení	typ	tavidlo	velikost kuliček	teplota přetavení
SAC 305	NEVO	Sn/Ag3,0/Cu0,5	PF606-P30	ROLO	20 - 38 $\mu\text{m}$	230 - 250 $^{\circ}\text{C}$
Sn/Bi	NEVO	Sn42/Bi58	PF602-P30	ROLO	20-45 $\mu\text{m}$	165 - 185 $^{\circ}\text{C}$
Sn/Bi/Ag	AIM Solder Paste	Sn42/Bi57/Ag1	NC273 LT	ROLO	-	170 - 185 $^{\circ}\text{C}$

Z důvodu nemožnosti provedení optické kontroly množství nanesené pájecí pasty (SPI - Solder Paste Inspection) byla provedena kontrola hmotnostní. Každá keramická destička byla zvážena před a po nanesení vodivé pasty a následným odečtením hodnot jsme získali hmotnost nanesené pasty (viz tab. 5.2). Tato metoda neposkytuje informaci o množství nanesené pájky na každé pájecí plošce, ale umožňuje posoudit reprodukovatelnost tisku pasty. Vážení bylo provedeno na vahách Sartorius CP225D, jejichž fotografie je uvedena na obr. 5.7. Tyto váhy měří s přesností na setiny miligramu (0,00001g).

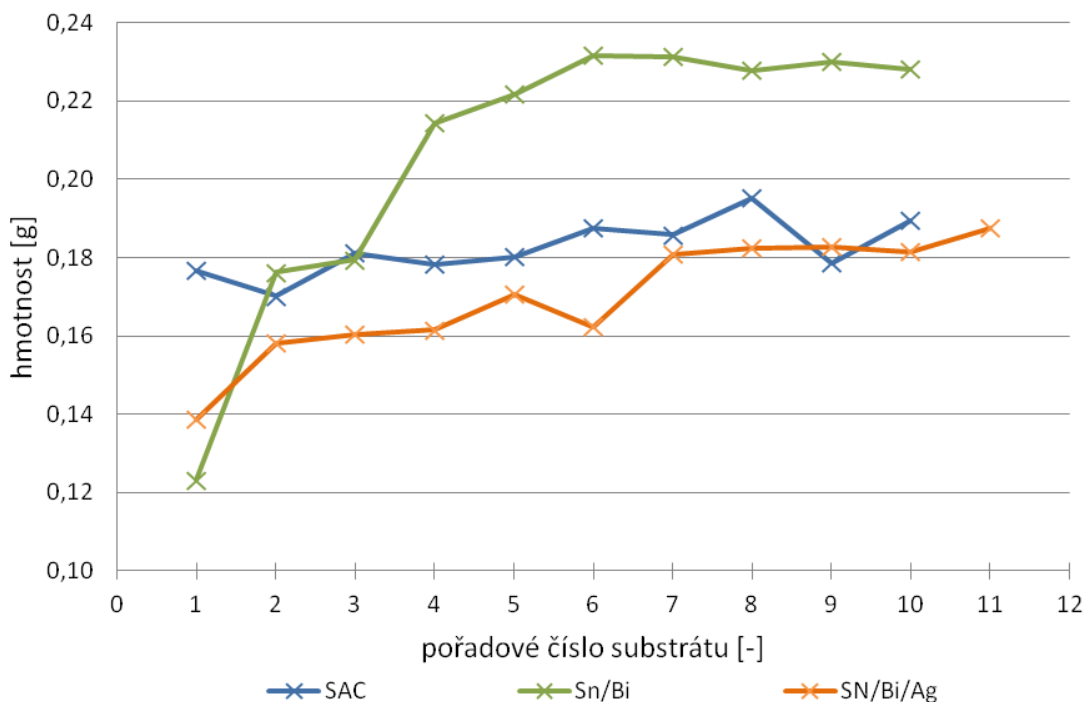


**Obr. 5.7:** Fotografie použitých vah Sartorius

**Tab. 5.2:** Tabulka množství nanesené pájecí pasty

pořadové čísla destičky	hmotnost pájecí pasty		
	[g]		
1	0,1766	0,12316	0,13865
2	0,17017	0,17616	0,15819
3	0,18119	0,17937	0,16041
4	0,17826	0,21442	0,16156
5	0,18024	0,22174	0,17061
6	0,18761	0,23164	0,16241
7	0,18579	0,23133	0,18092
8	0,19522	0,22775	0,18252
9	0,17852	0,23013	0,18277
10	0,18948	0,22807	0,18157
11	-	-	0,18764

Data z SPI byla dále pro větší přehlednost zpracována do grafu (viz obr. 5.8), z kterého lze vyčíst malý rozptyl množství nanesené SAC pájky a nepatrně větší rozdíl v množství Sn/Bi/Ag pájky. U pájky Sn/Bi je zcela jasně pozorovatelné menší množství pájky na substrátech číslo 1, 2 a 3. Od 4. substrátu se již množství nanesené pasty pohybuje v rozmezí srovnatelném s ostatními pájkami. Kompletní tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze 5.

**Obr. 5.8:** Množství nanesené pájecí pasty na jednotlivých testovacích substrátech

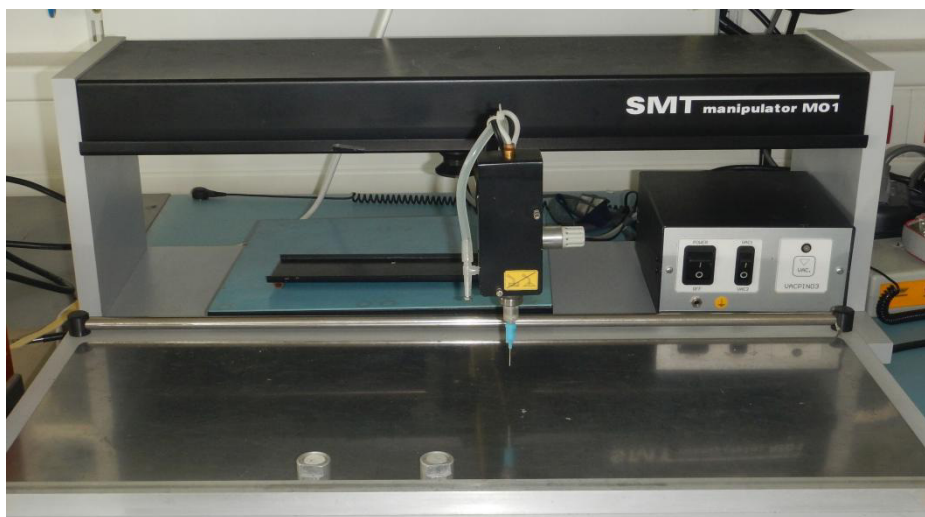
Důvod odchylky v množství nanesené pasty není znám, protože pro tisk všech past na všechny substráty byla použita stejná technika a tisk probíhal vždy oběma směry s dostatečným množstvím pájecí pasty na šabloně.

Protože výrobci testovaných pájecích past neuvádějí hustotu past, nebylo možné porovnat hmotnost nanesené pasty s teoretickým objemovým množstvím pasty, které by odpovídalo 100 % zaplnění otvorů v šabloně.

Po natisknutí pasty následoval její leveling a osazení součástkami na ručním SMT manipulátoru M01, jehož fotografie je uvedena na obr. 5.9.

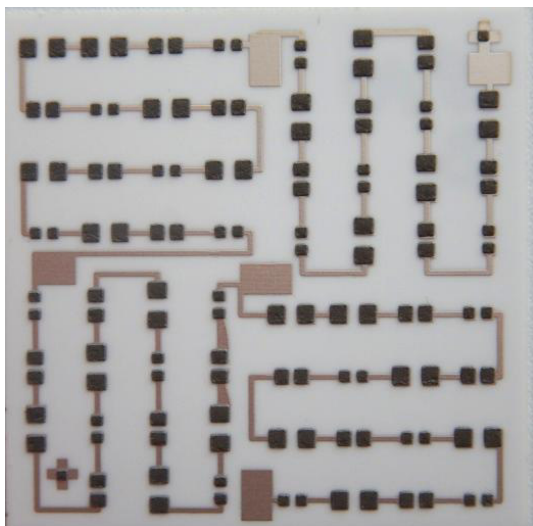
Rameno manipulátoru umožňuje pohyb v osách  $x$  a  $y$ , hlavice na konci ramene se pohybuje v ose  $z$ . Na hlavici je umístěna kovová jehla připojená k vlastnímu zdroji vakua a je vybavena otočným zařízením, které umožňuje rotaci součástky. Vzniklý podtlak drží SMD součástku na konci jehly. Přitlačením součástky k destičce dojde k vypnutí vakua a součástka zůstane osazena v pájecí pastě na substrátu.

Pro osazení byly zvoleny rezistory od výrobce YAGEO s hodnotou rezistivity  $0\ \Omega$  (0R0), aby bylo možné provést doplňkové měření závislosti změny elektrického odporu pájených spojů na počtu teplotních cyklů. Fotografie substrátu s natisknutou pájecí pastou je uvedena na obr. 10, osazený substrát je vyobrazen na obr. 5.11 a detail osazených, ale nezapájených součástek je na obr. 5.12.

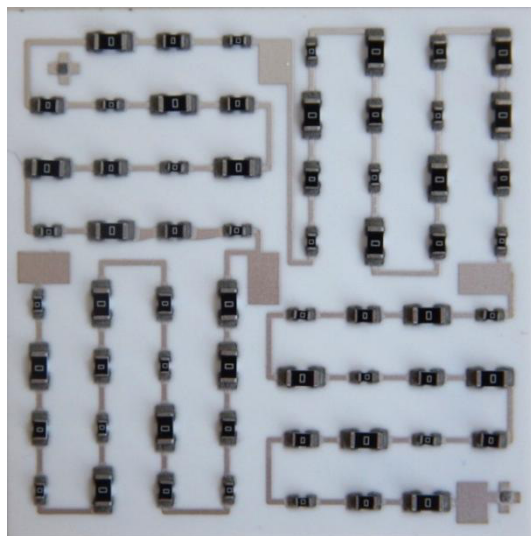


**Obr. 5.9:** Fotografie použitého ručního SMT manipulátoru M01

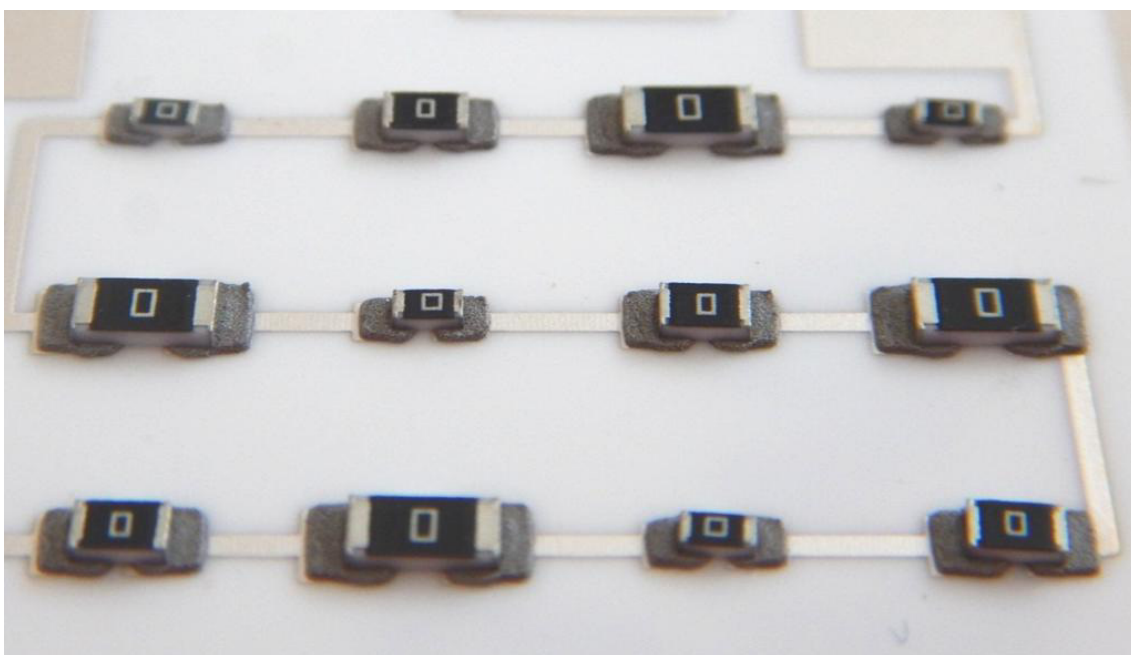




**Obr. 5.10:** Substrát s natisknutou pájecí pastou



**Obr. 5.11:** Osazený substrát



**Obr. 5.12:** Detail osazených součástek - nezapájené

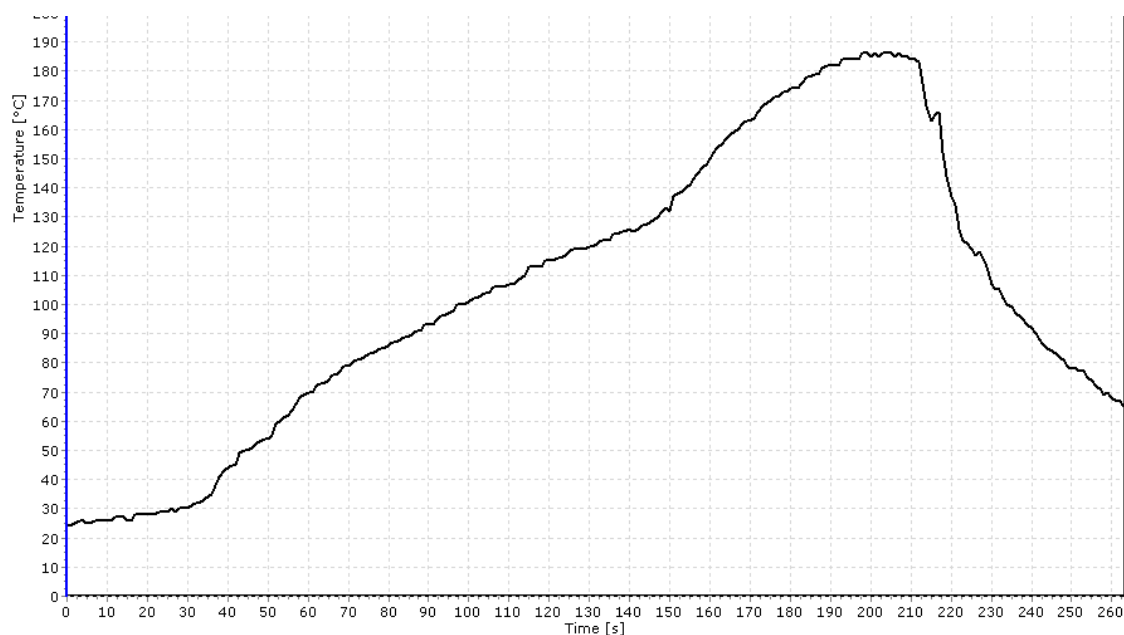
## 5.2 Pájení osazených substrátů

Pro zapájení osazených substrátů byla použita konvekční průtahová pec Essemtec RO300FC se 3 samostatně nastavitelnými teplotními zónami.

Doporučený profil pro pájení pájky PF602 - P30 (Sn42/Bi58) je uveden v příloze 9. Skutečně použitý přetavovací profil je uveden na obr. 5.13. Tento profil byl použit i pro

přetavení druhé testované bismutové pájky NC273 LT (Sn42/Bi57/Ag1). Výrobce doporučuje přetavovací profil pro tuto pájku je uveden v příloze 9.

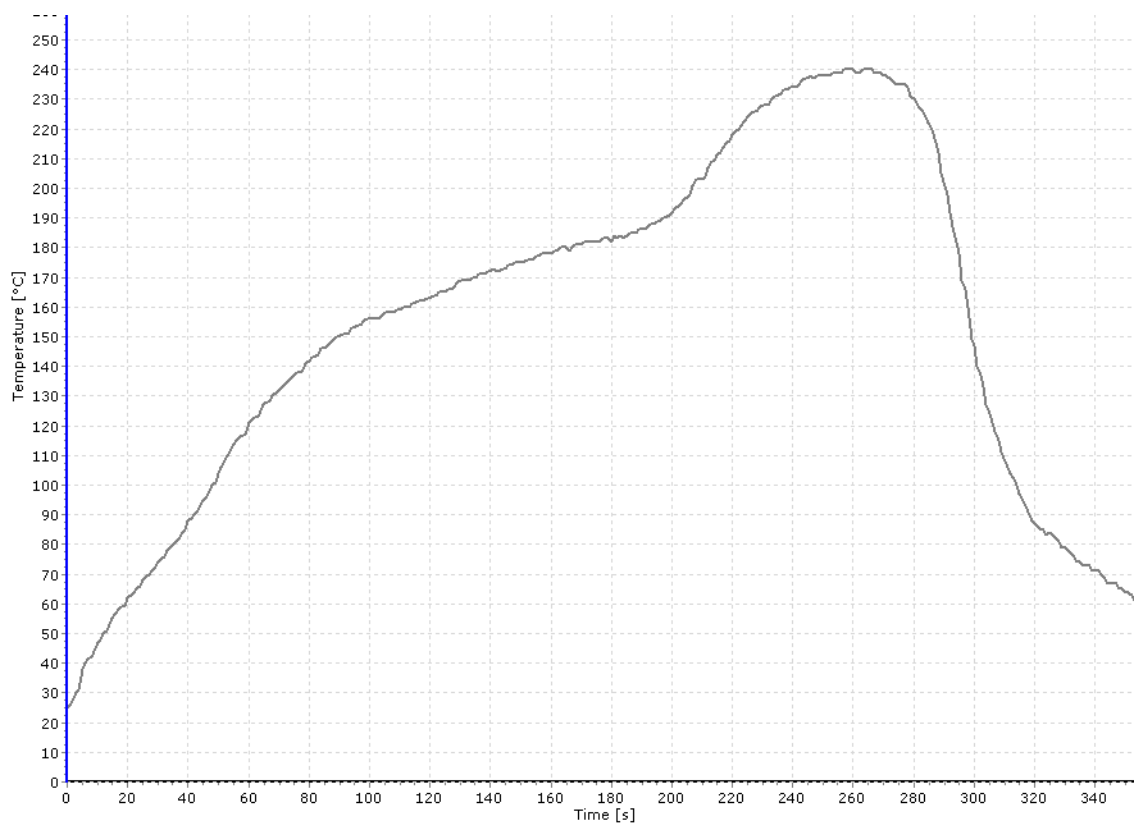
Vzhledem k problémům s regulací teplot v jednotlivých zónách průtahové pece musel být pro bismutové pájky použit přetavovací profil s teplotou přetavení na samé horní hranici výrobce doporučené teploty (185 °C).



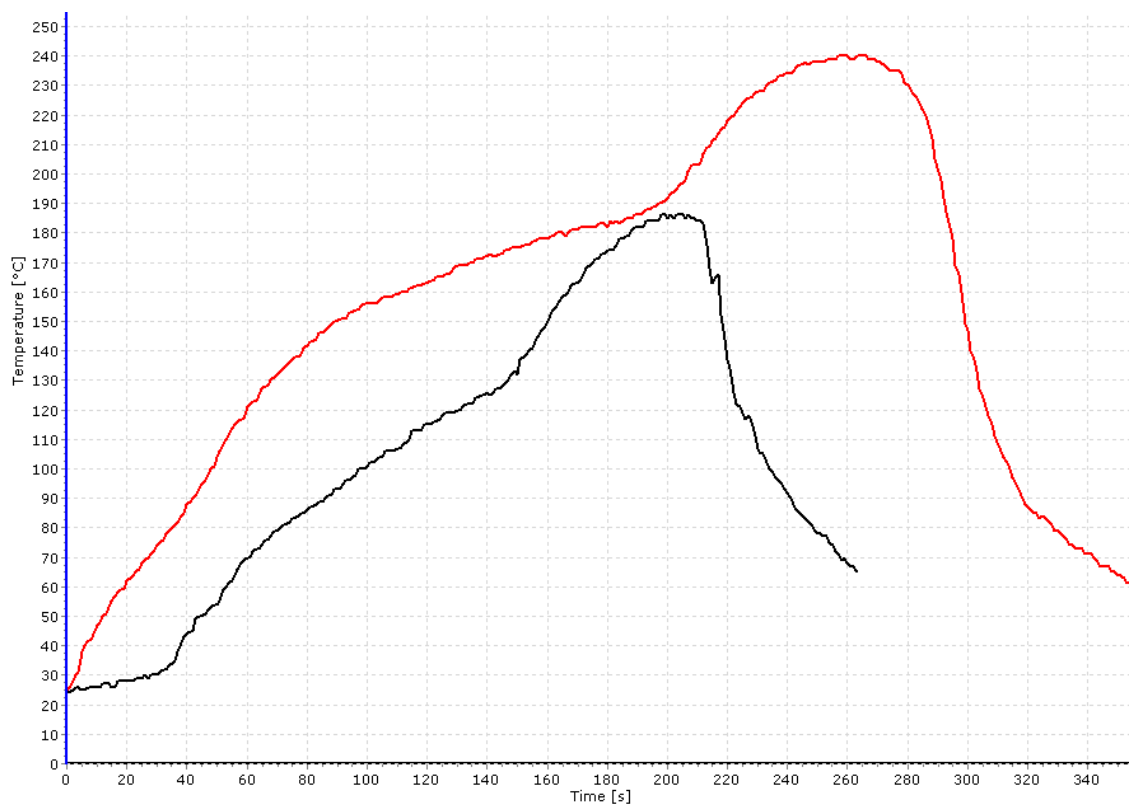
**Obr. 5.13:** Přetavovací profil použitý pro bismutové pájky

Výrobce doporučuje profil pro přetavení referenční pájky PF606 - P30 (SAC305) je uveden v příloze 9, skutečně použitý přetavovací profil je uveden na obr. 5.14.





**Obr. 5.14:** Přetavovací profil použitý pro SAC305 pájku



**Obr. 5.15:** Porovnání použitých přetavovacích profilů

Na obr. 5.15 je uvedeno porovnání obou použitých profilů. Zřetelně je zde vidět o více než 60 °C nižší teplota přetavení bismutových pájek a také je celý přetavovací proces o cca 100 sekund kratší než při použití SAC305 pájky. Důsledkem těchto rozdílů je nižší tepelné namáhání pájené sestavy a nezanedbatelná úspora elektrické energie nejen díky nižším použitým teplot, ale také kratší dobou, kdy je pec v provozu.

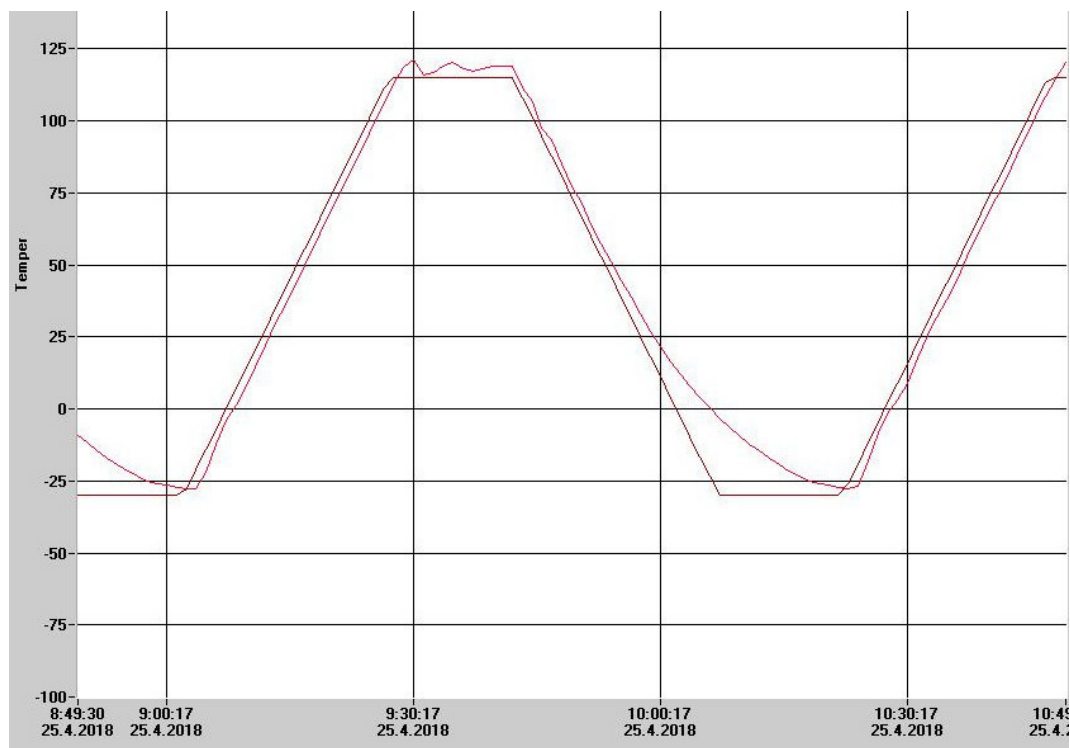
### 5.3 Podmínky teplotního stárnutí

Pro tepelné stárnutí byla použita teplotní komora CTS T-40-25 (viz obr. 5.16), umožňující nastavení teplotního cyklu v rozmezí teplot od -40 °C do +150 °C. Daný rozsah je plně dostačující, protože testovací cyklus dle normy IPC-9701 probíhá od -40 °C do +125 °C se setrváním 15 minut na maximální i minimální teplotě. Uvedený cyklus je používán např. k testování elektronických komponent automobilů umístěných mimo kabinu[10].



**Obr. 5.16:** Použitá teplotní komora CTS T-40-25

Z technických důvodů nebylo možné použít profil podle normy IPC - 9701, proto byl pro testování nastaven profil s rozmezím teplot od -30 °C do +115 °C s nastavenou prodlevou 15 minut. Nastavený a reálný profil jsou na obr. 5.17.



**Obr. 5.17:** Profil použitého teplotního cyklování

Pro zajištění stejné teploty každé testovací destičky v průběhu cyklu byly destičky vloženy do drátového držáku ve tvaru obráceného stroměčku a následně zavěšeny na drátovou klec (obr. 5.18). Tím bylo zajištěno proudění vzduchu okolo každé testovací destičky a lze tedy předpokládat, že všechny testovací substráty měly ve stejnou chvíli stejnou teplotu.



**Obr. 5.18:** Fotografie způsobu uložení testovaných substrátů v teplotní komoře

## 5.4 Podmínky testování pevnosti pájených spojů

Pro testování mechanické pevnosti zkoumaných pájených spojů byla zvolena zkouška stříhem. Provedena byla pomocí zařízení DAGE PC2400 (viz obr. 5.19), které je vybaveno mikroskopem a joystickem ovládajícím elektricky posuvný stolek pro přesné sesouhlasení trhačí hlavy s trhanou součástkou.

Pro testování byly na zařízení nastaveny tyto parametry:

- |  |                        |
|--|------------------------|
| • rychlost hrotu při testování výšky od desky:         | 300 $\mu\text{m/s}$ ,  |
| • výška hrotu od substrátu při testu:                  | 100 $\mu\text{m}$ ,    |
| • rychlost posuvu hrotu při testu:                     | 16,7 $\mu\text{m/s}$ , |
| • vzdálenost, kterou ujede hrot po utrnutí součástky:  | 500 $\mu\text{m}$ ,    |
| • rozsah měření:                                       | 100 N,                 |
| • procentní pokles z max. hodnoty, kdy se test ukončí: | 20 %,                  |
| • destruktivní test.                                   |                        |



**Obr. 5.19:** Zařízení DAGE PC2400

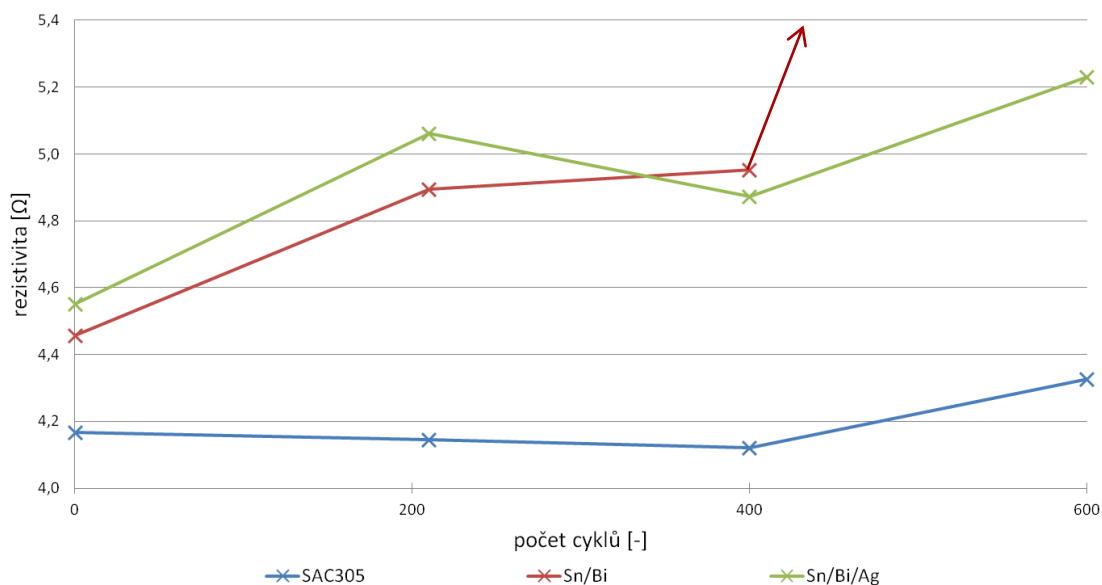
## 6 PRAKTICKÁ ČÁST - PREZENTACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

### 6.1 Naměřené hodnoty rezistivity pájených spojů

Na každém testovacím substrátu bylo umístěno celkem 62 SMD součástek (rezistorů o hodnotě rezistivity  $0\ \Omega$ ). Měřením 4 - vodičovou metodou byla získána představa o změně rezistivity 124 pájených spojů. V následující tabulce (tab. 6.1) jsou uvedeny naměřené hodnoty rezistivity v závislosti na počtu cyklů, které jsou následně zobrazeny v grafu na obr. 6.1.

**Tab. 6.1:** Průměrné hodnoty naměřené rezistivity pájených spojů.

počet cyklů	SAC305	Sn/Bi	Sn/Bi/Ag
[-]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
0	4,167	4,457	4,553
210	4,144	4,895	5,061
400	4,121	4,953	4,873
600	4,326	47,664	5,230



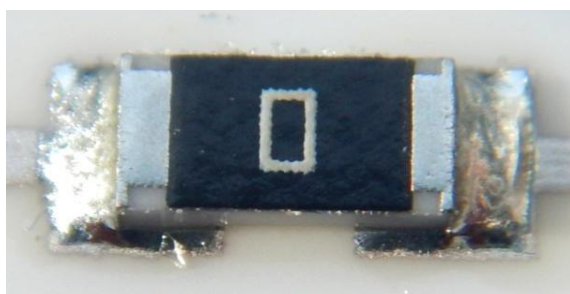
**Obr. 6.1:** Graf závislosti rezistivity pájených spojů na počtu teplotních cyklů

Z uvedených charakteristik závislosti rezistivity lze vyčíst konstantní hodnotu rezistivity SAC pájky až do hodnoty 400 cyklů a její mírný nárůst při měření po 600 cyklech. Naopak pájené spoje z bismutových pájek vykazovaly vyšší rezistivitu než

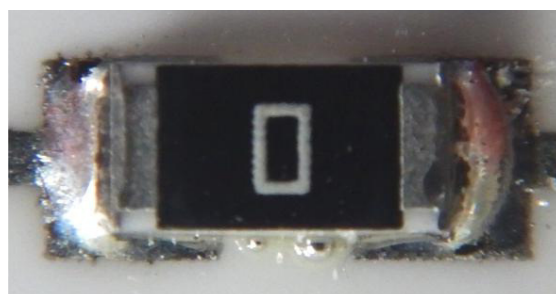
SAC pájka už před teplotním cyklováním. Následoval mírný nárůst rezistivity o cca 500 m $\Omega$  mezi 0 a 210 cykly. Následně při závěrečném měření po 600 cyklech bylo zjištěno selhání minimálně dvou pájených spojů u Sn/Bi pájky (typ PF602-P30). U 9. testovacího substrátu vzrostla rezistivita o cca 4  $\Omega$  (na 9,898  $\Omega$ ) a u 10. testovacího substrátu vzrostla rezistivita na cca 170  $\Omega$  (viz příloha 4). Takto razantní zvýšení by mělo nepochybně vliv na funkčnost celého designu umístěného na tomto substrátu. Pravděpodobná příčina je dále rozebrána v kapitole vyhodnocující změny vzhledu pájených spojů.

## 6.2 Vzhled a mikrovýbrusy spojů

Před zahájením teplotního cyklování byl vzhled referenční SAC pájky (obr. 6.2) a zkoumané Sn/Bi pájky stejný - lesklé spoje a žádné kuličky pájky okolo součástek. Na rozdíl od nich pájka Sn/Bi/Ag tvořila kuličky (obr. 6.3) v okolí spojů, ale tavidlové zbytky byly světlejší než u pájky Sn/Bi.



**Obr. 6.2:** Pájka SAC - 0 cyklů



**Obr. 6.3:** Pájka Sn/Bi/Ag - 0 cyklů

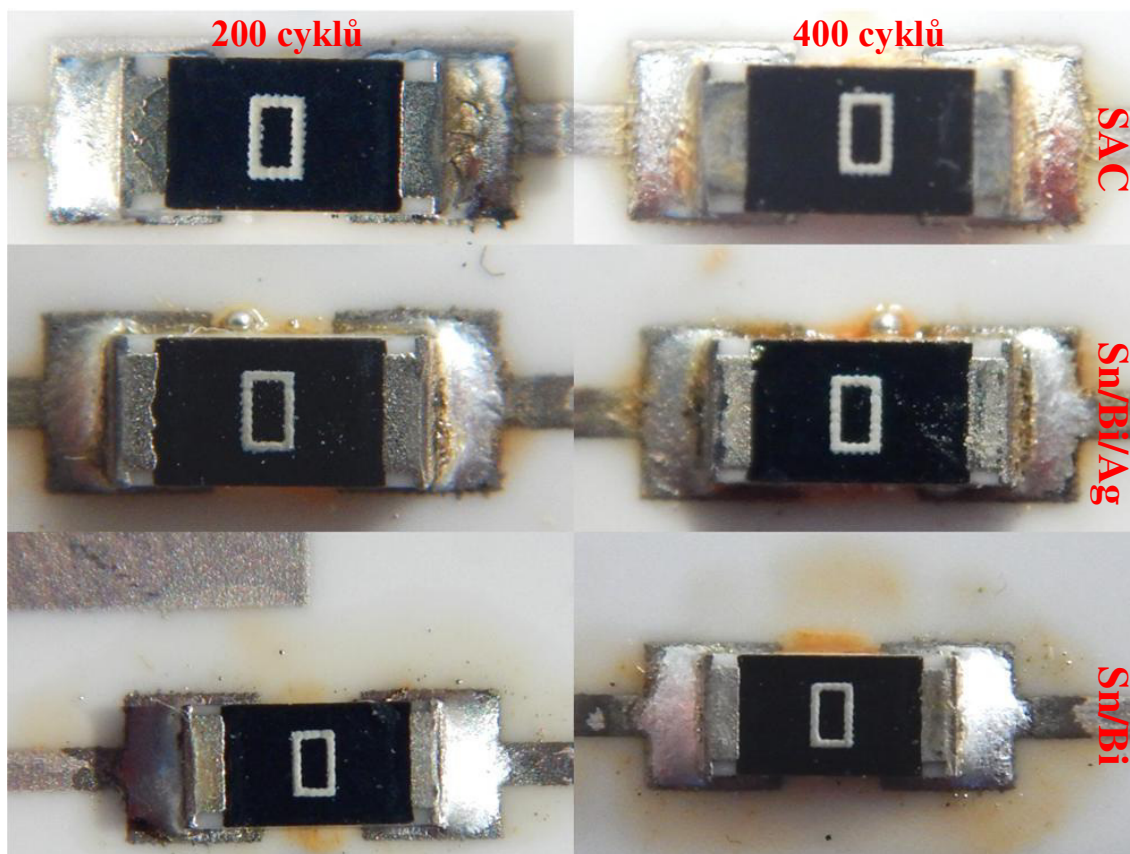
Se vzrůstajícím počtem cyklů docházelo k tmavnutí tavidlových zbytků u všech třech pájek. Po této změně barvy tavidlových zbytků byl dobře pozorovatelný rozdíl v jejich množství. Zatímco SAC a Sn/Bi/Ag pájka tvořily opravdu malé a srovnatelné množství tavidlových zbytků (i když v případě Sn/Bi/Ag pájky byly tmavší), mnohem větší množství zbytků se vyskytovalo v okolí součástek pájených pájkou Sn/Bi. Na následujícím obrázku (obr. 6.4) jsou uvedeny fotografie součástek zapájených všemi zkoumanými pájkami po 200 a 400 cyklech.

Po 600 cyklech nedošlo k žádným dalším změnám ve vzhledu SAC pájky, ovšem u bismutových pájek došlo k zcela zásadní změně. Na některých testovacích substrátech se objevila extrémní degradace pájených spojů (viz obr. 6.5). Z některých pájených spojů pájka téměř zmizela. Přehled rozsahu poškození na substrátech je uveden v tab. 6.2. Tato degradace měla pravděpodobně za následek i zvýšení rezistivity některých spojů u Sn/Bi pájky, které bylo zmiňováno v předchozí kapitole.

Podobná degradace bismutové pájky (obr. 6.6), ovšem ne v tak extrémním měřítku, byla publikována v [17], ale podmínky stárnutí teplotním cyklováním byly odlišné. Použitý základní materiál byla FR-4 s plátovanou mědí, nedocházelo k teplotnímu



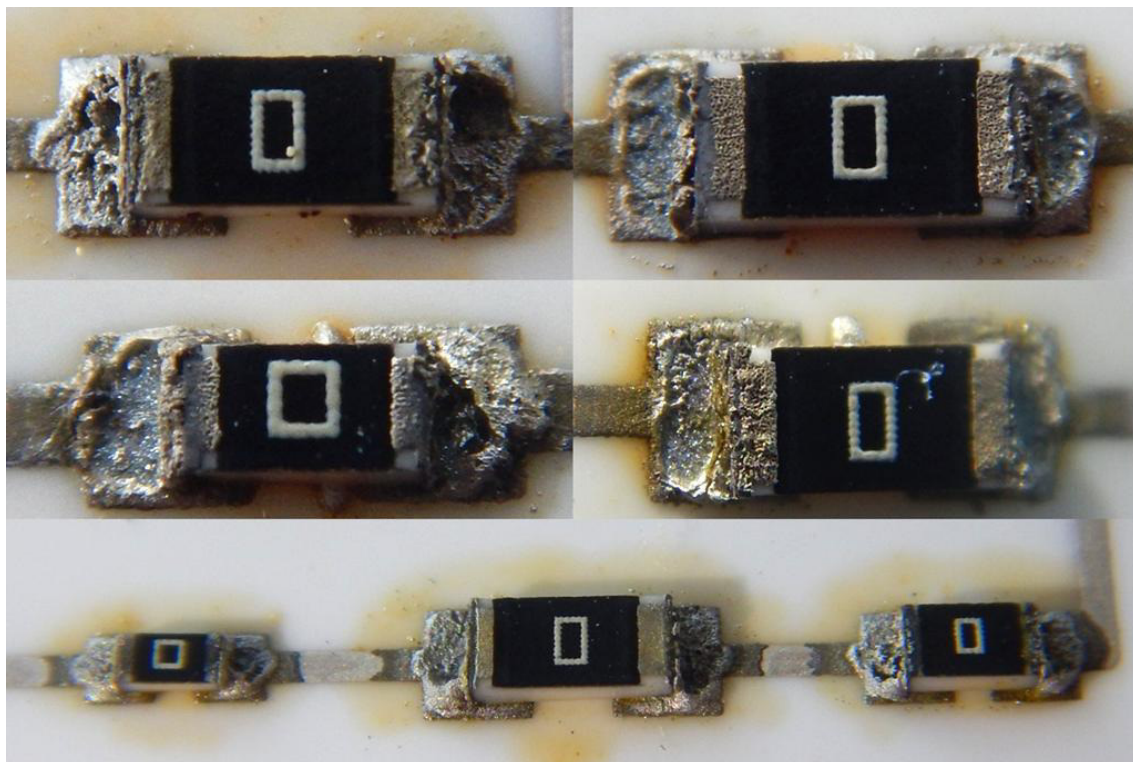
cyklování, ale jen k teplotnímu stárnutí při konstantní teplotě 100°C a poté k rozstříkávání solného roztoku.



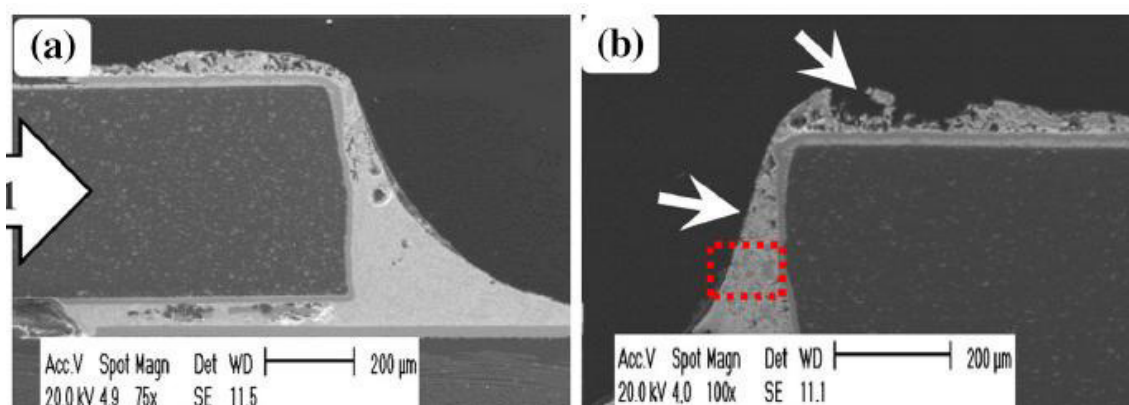
**Obr. 6.4:** Vzhled pájených spojů po 200 a 400 cyklech

**Tab. 6.2:** Přehled poškození jednotlivých substrátů po 600 cyklech

pájka	substrát číslo	rozsah poškození
Sn/Bi	7, 8	0%
	10	60%
	9	100%
Sn/Bi/Ag	10, 11	0%
	8	25%
	7	60%
	9	100%



**Obr. 6.5:** Degradace bismutových pájek po 600 cyklech



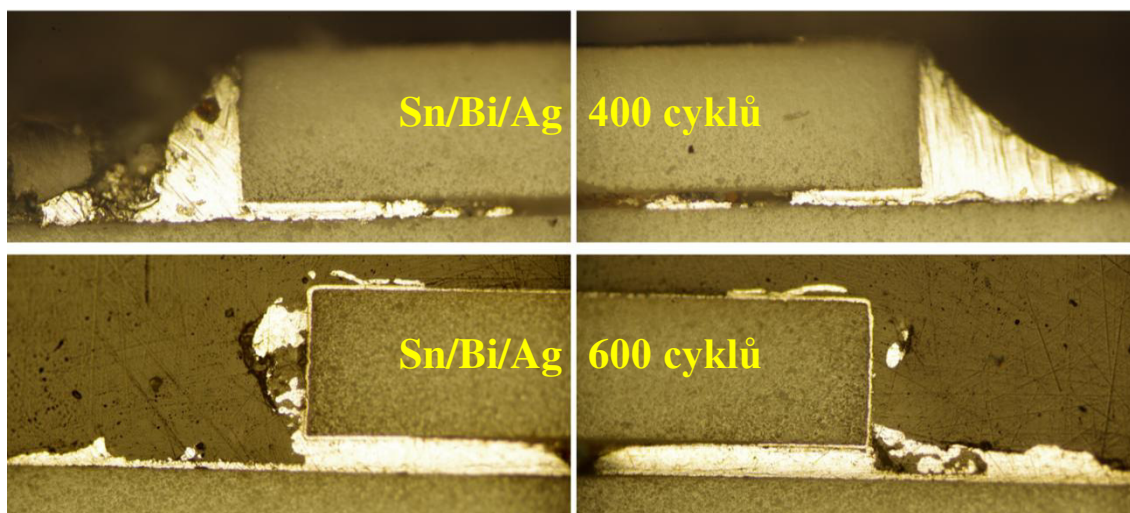
**Obr. 6.6:** Koroze bismutové pájky [17]

Na mikrovýbrusu spojů tvořených pájkou Sn/Bi/Ag (obr. 6.7) je zřetelná začínající koroze pájky již po 400 cyklech. Zde dochází k degradaci pájky nejen pod součástkou, ale také ve spoji vlevo od součástky. Mikrovýbrus pájeného spoje po 600 cyklech odhaluje neporušenost pájky pod součástkou, ale většina pájky tvořící viditelnou část spoje na bocích součástky již není přítomna.

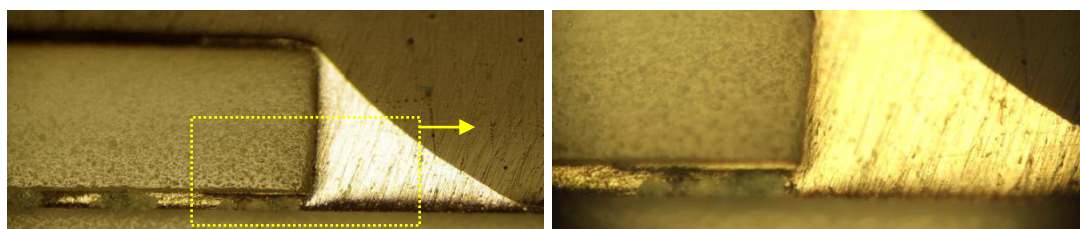
Další příklad koroze bismutové pájky (Sn/Bi) po 400 cyklech je uveden na obr. 6.8, zde došlo ke korozi pájky pod součástkou.

Fotografie výbrusů všech použitých pájek jsou uvedeny v příloze 6-8.





**Obr. 6.7:** Mikrovýbrusy spojů pájky Sn/Bi/Ag

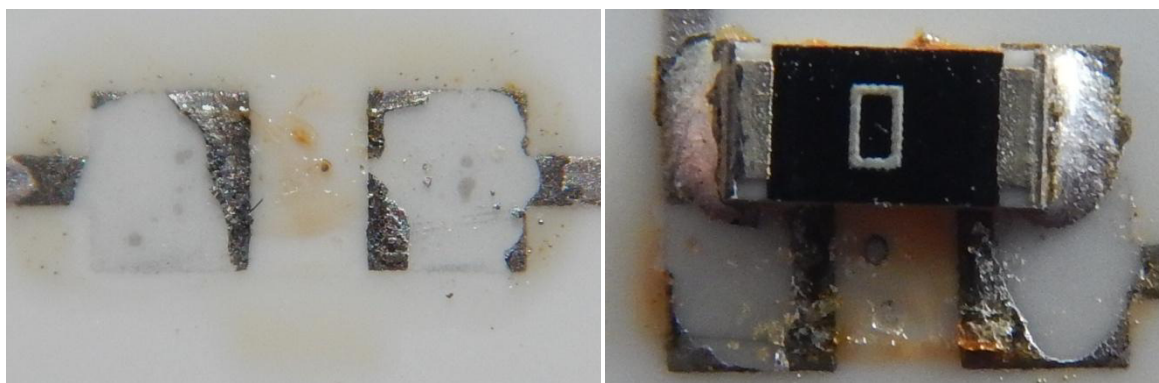


**Obr. 6.8:** Mikrovýbrus spoje pájky Sn/Bi po 400 cyklech

### 6.3 Test pevnosti spojů zkouškou stříhem

Tato zkouška byla zvolena jako hlavní pro posouzení změn probíhajících v pájeném spoji při teplotním cyklování. Zkouška pevnosti pájených spojů před tepelným stárnutím proběhla standardně, ovšem již po 200 cyklech došlo u bismutových pájek k narušení vazby mezi keramickým substrátem a vodivou pastou mající za následek utržení pájecích plošek ze substrátu. Tvar odtrhnuté části vodivé pájecí plošky kopíroval tvar na ní vytvořeného pájeného spoje (viz obr. 6.9). K tomuto způsobu odtržení došlo ve 100% případech při měření pevnosti bismutových spojů, v případě SAC pájky mělo měření předpokládaný průběh (k odtržení vodivé plošky ze substrátu nikdy nedošlo).

Protože všechny pájecí pasty obsahovali tavidlo ROL0, lze předpokládat, že vazbu mezi vodivou pastou a substrátem narušila reakce s bismutem.



**Obr. 6.9:** Fotografie utržených pájecích plošek bismutových pájek

I přes skutečnost, že se v případě bismutových pájek měření pevnosti pájeného spoje následně změnilo v měření přilnavosti vodivé plošky k substrátu, bylo s daty nakládáno jako kdyby test pevnosti pájených spojů probíhal standardně. Byla provedena statistická analýza získaných dat za využití Studentova nepárového t-testu a souhrnné výsledky jsou uvedeny v tab. 6.3. Testována byla nulová hypotéza  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  (zda se shoduje střední hodnota 2 souborů výběrových dat). Hodnoty pevnosti pájky před teplotním stárnutím představují první soubor dat, druhý soubor dat je tvořen hodnotami pevnosti pájky po daném počtu teplotních cyklů.

Výsledek t-testu představuje pravděpodobnost nulové hypotézy o shodě průměrů obou souborů (pravděpodobnost chyby  $\alpha=0,01$ ). Protože je tato pravděpodobnost  $p < 0,01$ , znamená to, že rozdíl mezi testovanými středními hodnotami je statisticky vysoce významný (zamítnutí nulové hypotézy o shodě středních hodnot) a může být vysloven závěr, že teplotní stárnutí mělo statisticky vysoce významný vliv na pevnost pájeného spoje (kromě dvou případů SAC pájky po 210 cyklech a velikosti součástek 0805 a 0603).

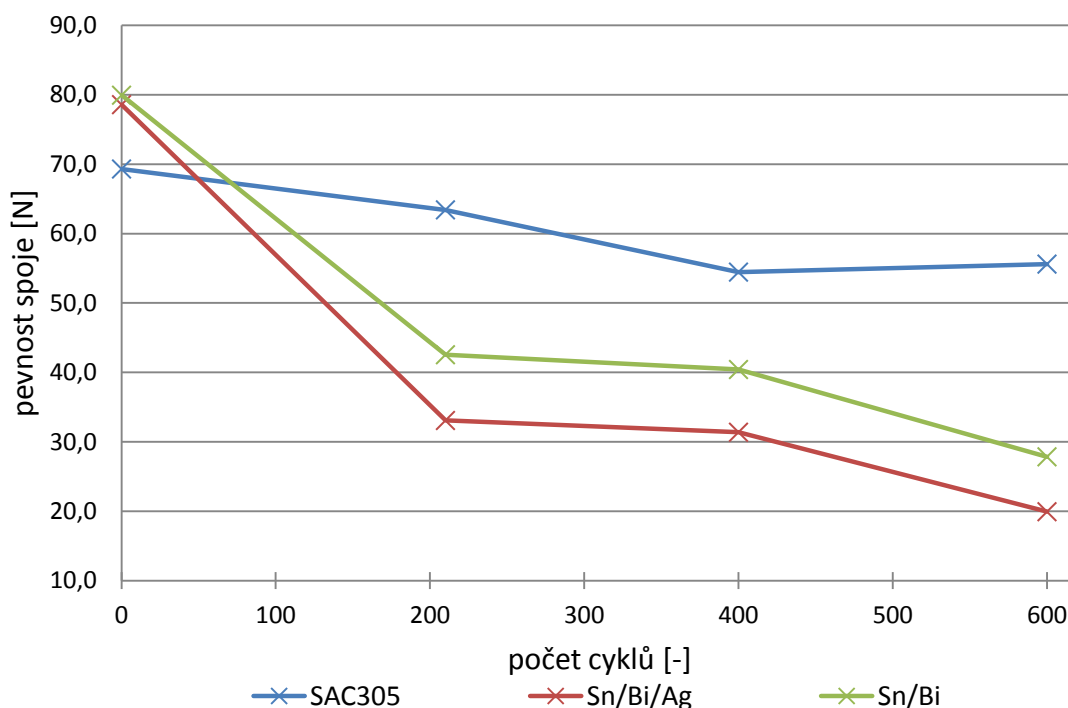
**Tab. 6.3:** Souhrnné výsledky statistické analýzy dat - Studentův t-test

pájka	součástka	1206			0805			0603		
		210	400	600	210	400	600	210	400	600
SAC305	F-test	4,4E-03	4,7E-01	1,8E-03	5,7E-03	5,8E-01	8,6E-01	5,1E-03	1,1E-02	9,7E-04
	významnost	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05
	T-test	2,8E-04	3,0E-13	3,2E-13	1,3E-02	1,0E-15	1,0E-13	1,3E-01	1,4E-15	2,6E-10
	významnost	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01
Sn/Bi	F-test	2,9E-01	5,1E-01	3,4E-01	7,5E-01	8,4E-01	4,2E-01	2,5E-02	2,3E-05	5,4E-02
	významnost	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05
	T-test	1,4E-29	1,5E-32	1,2E-44	1,7E-44	8,4E-47	1,8E-51	2,3E-28	5,7E-30	7,5E-39
	významnost	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01
SN/Bi/Ag	F-test	2,1E-04	8,9E-03	2,4E-04	3,6E-01	8,3E-01	5,4E-02	2,1E-01	4,0E-01	3,2E-03
	významnost	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05
	T-test	1,1E-26	7,6E-28	2,0E-33	1,4E-42	1,8E-42	3,0E-43	9,5E-21	3,4E-13	3,0E-30
	významnost	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01	p>0,01

Poté bylo přistoupeno k vyhodnocení změn pevnosti pájených spojů v závislosti na počtu teplotních cyklů. Souhrnné výsledky průměrné pevnosti pájených spojů z každé série substrátů po teplotním stárnutí pro velikost součástek 1206 jsou uvedeny v tab. 6.4 (kompletní tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze 1 až 3). Následné zpracování těchto hodnot do grafické podoby je uvedeno na obr. 6.10.

**Tab. 6.4:** Průměrné hodnoty pevnosti pájeného spoje v závislosti na počtu teplotních cyklů - součástky 1206

počet cyklů	velikost součástky	1206		
	pájka	SAC350	Sn/Bi	Sn/Bi/Ag
0	F [N]	69,27	80,01	74,79
	směrodatná odchylka [N]	8,16	8,65	13,36
210	F [N]	63,44	42,50	33,09
	směrodatná odchylka [N]	5,19	10,27	7,39
400	F [N]	54,44	40,42	31,39
	směrodatná odchylka [N]	7,29	9,63	8,81
600	F [N]	55,63	27,91	19,97
	směrodatná odchylka [N]	4,96	7,45	7,43



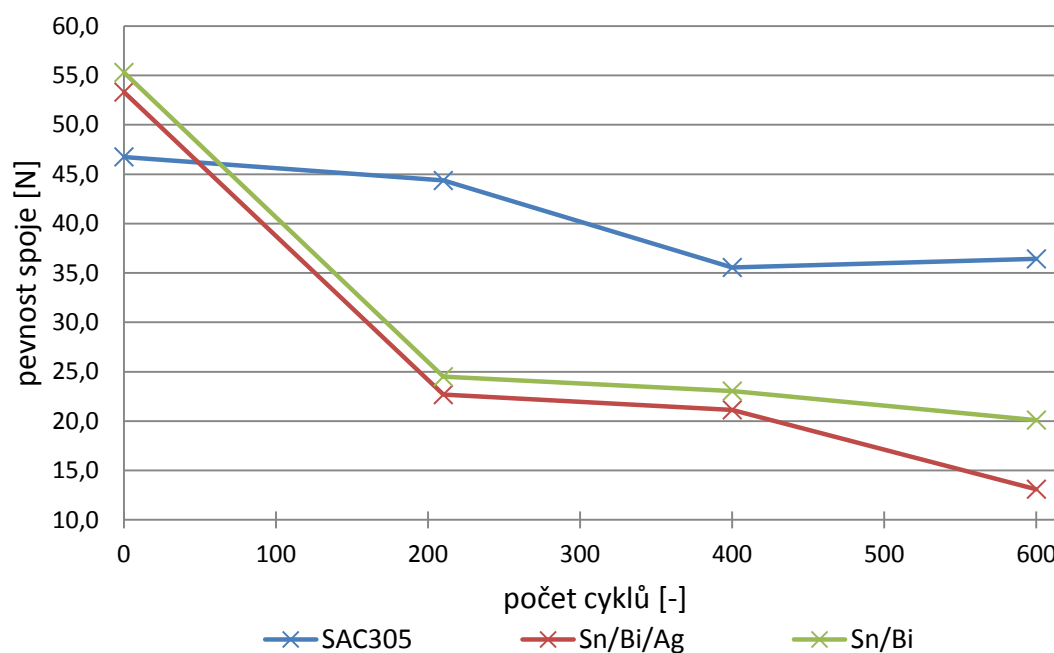
**Obr. 6.10:** Průměrná hodnota pevnosti pájených spojů součástek o velikosti 1206

Z výše uvedeného grafu (obr. 6.10) lze vyčíst před zahájením teplotního cyklování o cca 10 N vyšší pevnost spojů tvořených bismutovými pájkami než je pevnost SAC pájky. Následný propad pevnosti spojů po 200 teplotních cyklech je způsoben (jak již bylo řečeno na začátku kapitoly) narušením přilnavosti vodivé pasty k substrátu. S dalším růstem počtu teplotních cyklů již není propad pevnosti spojů tak strmý. Pevnost SAC spojů vykazuje téměř lineární pokles v intervalu 0-400 cyklů, poté je konstantní mezi 400. a 600. cyklem. Celkový pokles pevnosti SAC spojů po 600 cyklech je cca o 20 % z počáteční hodnoty.

Před zahájením teplotního stárnutí vykazovaly bismutové pájky vyšší pevnost než SAC pájka i při testování na velikosti součástek 0805 a 0603, totožný byl i propad pevnosti už po 200 teplotních cyklech. Také průběh pevnosti SAC pájky testované na součástkách o velikosti 0805 a 0603 je podobný jako v případě použití součástek 1206, jen pokles pevnosti mezi 0. a 200. cyklem je menší než pokles pevnosti mezi 200. a 400. cyklem. Následné mírné zvýšení pevnosti mezi 400. a 600. cyklem je stejné u všech velikostí součástek zapájených SAC pájkou. Naměřené hodnoty pevnosti pájky pro součástky 0805 jsou uvedeny v tab. 6.5, pro součástky 0603 v tab. 6.6. Grafické zpracování získaných výsledků pro součástky 0805 je uvedeno na obr. 6.11, pro součástky 0603 na obr. 6.12.

**Tab. 6.5:** Průměrné hodnoty pevnosti pájeného spoje v závislosti na počtu teplotních cyklů - součástky 0805

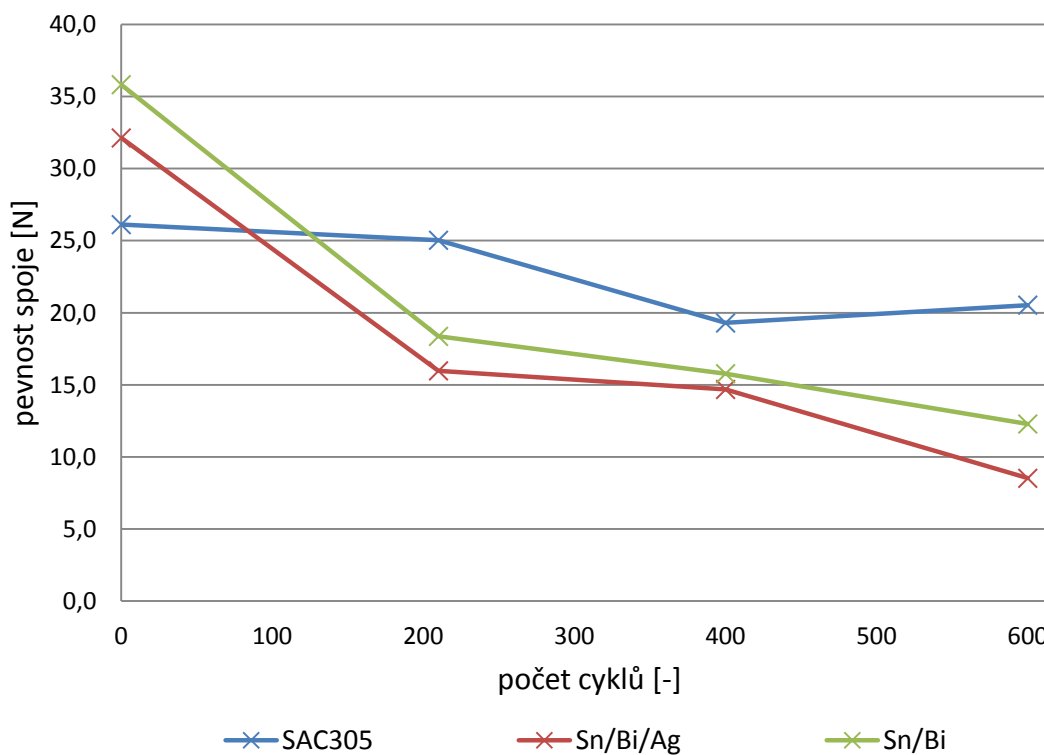
počet cyklů	velikost součástky	0805		
	pájka	SAC350	Sn/Bi	Sn/Bi/Ag
0	F [N]	46,90	55,29	53,31
	směrodatná odchylka [N]	5,01	4,35	5,16
210	F [N]	44,36	24,49	22,67
	směrodatná odchylka [N]	3,16	4,58	4,44
400	F [N]	35,55	23,04	21,13
	směrodatná odchylka [N]	4,58	4,49	4,98
600	F [N]	36,42	20,10	13,10
	směrodatná odchylka [N]	4,87	3,81	7,05



**Obr. 6.11:** Průměrná hodnota pevnosti pájených spojů součástek o velikosti 0805

**Tab. 6.6:** Průměrné hodnoty pevnosti pájeného spoje v závislosti na počtu teplotních cyklů - součástky 0603

počet cyklů	velikost součástky	0603		
	pájka	SAC350	Sn/Bi	Sn/Bi/Ag
0	F [N]	26,07	35,90	32,13
	směrodatná odchylka [N]	2,19	4,65	6,08
210	F [N]	25,03	18,37	15,95
	směrodatná odchylka [N]	3,54	3,22	4,95
400	F [N]	19,29	15,81	14,70
	směrodatná odchylka [N]	3,38	2,22	6,96
600	F [N]	20,56	12,29	8,52
	směrodatná odchylka [N]	3,88	3,39	3,75



**Obr. 6.12:** Průměrná hodnota pevnosti pájených spojů součástek o velikosti 0603

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo hlavně praktické zkoumání mechanických vlastností nízkoteplotních bismutových pájecích past vystavených zrychlenému stárnutí teplotním cyklováním. Tyto pájky jsou považovány za možnou náhradu pájek olovnatých nejen pro teplotu přetavení pod 200 °C, ale také pro příznivou cenu.

V teoretické části práce byly nejprve rozebrány druhy používaných pájek a vliv různých příměsí na jejich vlastnosti. Následně se práce zabývá pastami používanými pro výrobu obvodů tlustovrstvou technologií. Uvedeny jsou také faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje a způsoby testování pevnosti pájených spojů.

Praktická část byla rozdělena na dvě kapitoly. První kapitola popisuje výrobu a vybavení použité pro výrobu testovacích substrátů. V druhé kapitole jsou prezentována získaná data a závěry z těchto dat získané.

Pro vytvoření vodivého motivu na keramickém substrátu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) byla zvolena stříbro - palladiová pasta ESL 9695-G od výrobce ElectroScience. Testování probíhalo na bismutové pájce Sn42/Bi58 od výrobce NEVO a na pájce Sn42/Bi47/Ag1 od výrobce AIM Solder Paste. Pro porovnání výsledků byla zvolena pájka SAC305 výrobce NEVO. Mechanická pevnost zkoumaných pájek byla testována po 0, 210, 400 a 600 cyklech zrychleného stárnutí teplotním cyklováním od -30 do +115 °C. Testování pevnosti pájeného spoje probíhalo zkouškou stihem.

Zkoumáním pevností pájených spojů byla zjištěna vyšší počáteční pevnost bismutových pájek než referenční SAC pájky. Protože došlo pod bismutovými pájkami po teplotním cyklování k narušení vazby mezi pájecími ploškami z vodivé pasty a keramickým substrátem, reprezentují získané hodnoty pevnosti spojů míru přilnavosti vodivých plošek k substrátu. Ve výsledku poklesla pevnost bismutových spojů po 600 cyklech o 75 % počáteční hodnoty pevnosti. U referenční pájky SAC305 byl zjištěn pokles pevnosti spojů cca o 20 %. Poměrný pokles pevnosti není závislý na velikosti součástek.

Při optickém hodnocení byla odhalena po 600 cyklech extrémní koroze 50 % bismutových spojů. Při doplňkovém měření rezistivity spojů bylo navíc zjištěno selhání vodivého kontaktu nejméně u dvou spojů. Vzhledem k metodě měření, kdy byla zkoumána rezistivita testovací destičky jako celku, nelze přesně určit, který spoj u které velikosti součástky selhal.

Zda došlo k narušení adheze vodivých plošek ke keramickému substrátu nevhodnou kombinací stříbro - palladiové vodivé pasty a bismutových pájek je třeba podrobit dalšímu zkoumání. Stejně jako příčinu extrémní koroze bismutových pájek. Zda byla způsobena nevhodnou materiálovou kombinací, nízkými nebo vysokými teplotami při tepelném stárnutí. Za současných poznatků však nemůže použití bismutových pájek na keramických substrátech při teplotách -30 až +115 °C nahradit SAC pájku.

# Literatura

- [1] Evropský parlament a Rada EU, Směrnice Evropského parlamentu a rady 2011/65/EU [online], [citováno 2018-04-28].  
Dostupné z <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:CS:PDF>>
- [2] STARÝ, Jiří; KAHLE, Petr. Plošné spoje a povrchová montáž [online]. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.  
Dostupné z <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=21618](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618)>.
- [3] SZENDIUCH, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky [online] [citováno 2018-03-15].  
Dostupné z: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>.
- [4] Abtev, Mulugeta. Lead-free soldem in microelectronics [online].  
[citováno 2018-03-15] Dostupné z:  
<<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0927796X0000103>>.
- [5] Szendiuch, I. Učební text k předmětu BMTS – Mikroelektronika a technologie součástek [online] [citováno 2018-03-16]. Dostupné z:  
<[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-06A-Propojov%C3%A1n%C3%AD%20v%20elektronice%20%20elektrick%C3%A9%20spoj\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-06A-Propojov%C3%A1n%C3%AD%20v%20elektronice%20%20elektrick%C3%A9%20spoj(Bc).pdf)>.
- [6] MIRIC, A. Z.; GRUSD, Angela. Soldering & Surface Mount Technology [online][citováno 2018-03-16]. Dostupné z:  
<[search.proquest.com.ezproxy.techlib.cz/docview/216209359/fulltext/970BEC09E4F64853PQ/1?accountid=119841](http://search.proquest.com.ezproxy.techlib.cz/docview/216209359/fulltext/970BEC09E4F64853PQ/1?accountid=119841)>.
- [7] SMT centrum. Srovnání pájecích slitin SAC a SN100 [online]. Vydáno 31. 12. 2009 [citováno 2018-3-16]. Dostupné z: <<http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100/>>.
- [8] Szendiuch, I. Učební text k předmětu BMTS – Mikroelektronika a technologie součástek [online] [citováno 2018-03-20]. Dostupné z:  
<[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy(Bc).pdf)>.
- [9] NING-CHENG. LEE, Reflow soldering processes and troubleshooting : SMT, BGA, CSP and flip chip technologies, 270s, 2002. ISBN 0-7506-7218-8.
- [10] DOSEDLA, M. *Trendy v oblasti pájecích past a vliv nanočástic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2016. 81 s., 9 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [11] NOVOTNÝ, V. *Termomechanická spolehlivost pájených propojení v elektronice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 97 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.



- [12] JEŽEK, V. Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 71 s. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [13] DUSEK, Miloš.; HUNT, Christopher. Crack detection methods for lead - free solder joints [online]. 3/2004, [citováno 2018-03-20]. Dostupné z: <[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/matc164.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc164.pdf)>.
- [14] ČSN EN 62137 - 1 - 2. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - část 1 - 2: Zkouška pevnosti ve smyku. 2008.
- [15] LIPA VSKÝ, L. Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky stříhem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 53 s.
- [16] ENTEGGART, Ian. The role of micromechanical testing in microelectronics [online]. [citováno 2018-04-5]. Dostupné z: <<http://www.instron.com/wa/library/StreamFile.aspx?doc=47>>.
- [17] MILAD MOSTOFIZADEH, JUHA PIPPOLA, LAURA FRISK. Shear Strength of Eutectic Sn-Bi Lead-Free Solders After Corrosion Testing and Thermal Aging[online]. [Citováno 2018-5-10]. Dostupné z: <<https://search-proquest-com.ezproxy.techlib.cz/docview/1512523869?pq-origsite=summon>>.

## Seznam příloh

Příloha 1 - Tabulka naměřených hodnot pevnosti spojů pájky SAC305 .....	40
Příloha 2 - Tabulka naměřených hodnot pevnosti spojů pájky Sn/Bi.....	41
Příloha 3 - Tabulka naměřených hodnot pevnosti spojů pájky Sn/Bi/Ag.....	42
Příloha 4 - Tabulka naměřených hodnot rezistivity jednotlivých substrátů .....	43
Příloha 5 - Tabulky množství nanesené pájecí pasty .....	44
Příloha 6 - Fotografie mikrovýbrusů - pájka Sn/Bi/Ag .....	46
Příloha 7 - Fotografie mikrovýbrusů - pájka Sn/Bi .....	47
Příloha 8 - Fotografie mikrovýbrusů - pájka SAC.....	48
Příloha 9 - Výrobci doporučené profily pro přetavení pájecích past .....	49

# 1. Tabulka naměřených hodnot pevnosti spojů pájky SAC305

pájka SAC305 (PF606 - P30)												
	0 cyklů						210 cyklů					
	DPS 1			DPS 2			DPS 3			DPS 4		
velikost součástek	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603
F [N]	65,105	48,616	22,762	62,292	46,095	27,423	68,708	43,391	18,387	60,295	48,768	25,782
	71,935	44,056	29,825	52,703	47,056	24,637	67,195	44,511	25,723	65,821	42,542	27,727
	66,152	44,266	26,381	54,781	44,535	26,389	64,611	41,900	25,062	52,213	40,098	31,537
	76,328	51,469	28,101	58,419	49,298	26,778	65,615	45,601	22,244	71,822	39,748	25,501
	71,802	44,523	23,162	83,722	37,425	22,251	65,724	41,125	24,831	58,774	47,651	26,525
	67,273	39,919	25,723	60,085	49,021	26,715	61,248	50,593	23,213	68,437	45,192	25,959
	66,529	51,886	26,342	78,601	49,419	25,719	67,635	47,594	25,233	57,069	47,119	24,926
	66,642	47,967	28,229	68,063	48,480	24,470	60,844	43,398	28,054	71,519	39,709	26,692
	73,678	45,107	29,404	62,824	47,527	27,972	64,747	41,016	25,345	64,121	38,760	22,547
	76,103	50,473	28,085	72,593	51,718	24,797	60,350	46,621	23,532	65,163	46,687	23,914
	72,799	49,084	23,435	73,819	54,450	27,611	64,833	42,445	24,485	68,285	47,189	27,346
	77,200	47,730	24,295	70,989	43,329	23,929	70,273	40,745	27,148	70,464	41,309	28,825
	66,094	44,686	27,832	84,325	40,265	22,255	66,829	46,842	24,505	57,567	47,499	27,283
	69,078	50,186	23,104	74,733	50,676	27,314	65,378	52,244	24,443	69,985	46,018	24,011
	59,684	40,753	28,388	63,728	51,555	23,505	54,953	41,032	21,875	56,991	43,080	23,524
	72,145	59,435	29,093	65,028	35,670	27,918	65,903	44,511	23,595	53,178	43,651	23,961
	83,259			79,586	50,099	25,719	67,763	42,441	26,306	61,914	39,394	35,164
	71,640			75,722	51,465	26,213	66,592	47,675	24,517	57,766	44,118	22,170
	79,847			71,160	37,538	29,424	70,985	45,986	25,438	61,331	44,403	25,517
	65,090			51,204	42,608	23,493	63,140	46,026	27,672	56,112	45,660	10,799
			57,193			56,369			58,607			
						60,991						
	400 cyklů						600 cyklů					
	DPS 5			DPS 6			DPS 7			DPS 8		
velikost součástek	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603
F [N]	47,076	32,043	20,543	59,828	38,888	23,971	55,221	45,823	20,485	56,528	43,709	20,189
	57,474	39,375	22,633	50,882	43,434	16,134	59,809	37,421	16,240	51,092	39,238	26,268
	60,984	41,601	18,706	59,961	39,596	19,858	56,594	36,611	16,990	50,380	39,588	20,917
	53,248	38,584	18,427	63,142	39,242	24,552	55,722	36,332	23,419	57,474	32,837	26,233
	48,383	40,288	20,306	53,294	35,689	23,350	50,415	38,406	20,940	55,026	32,895	22,390
	63,338	34,658	20,730	56,575	31,933	20,586	63,276	26,209	21,236	52,766	31,059	20,679
	64,311	27,303	19,465	57,435	35,958	19,672	56,746	43,531	18,959	52,645	34,070	23,061
	66,569	30,899	13,208	59,190	35,051	18,819	51,497	31,848	21,193	54,862	36,732	23,376
	43,733	42,791	10,465	48,029	32,556	17,223	56,224	25,446	14,683	60,194	42,461	19,952
	58,692	37,101	20,563	57,077	28,724	16,753	52,275	31,132	20,758	57,976	33,109	22,466
	59,278	24,937	14,433	49,994	35,207	19,653	55,945	36,973	31,389	62,195	41,099	19,594
	45,255	36,207	19,835	49,286	32,121	9,702	59,120	33,167	20,489	58,229	38,667	22,092
	54,247	30,759	17,531	50,030	43,106	26,509	63,350	36,565	7,515	61,237	40,114	19,147
	43,954	39,790	19,212	44,146	33,647	20,711	50,111	37,898	24,979	47,364	35,265	22,427
	53,652	35,417	16,932	51,341	28,026	17,796	58,007	39,137	20,570	57,361	38,266	19,554
	54,742	36,479	18,204	41,107	41,643	19,987	45,216	24,918	11,133	60,603	40,500	22,470
	50,566	35,242	21,719	68,751	34,051	24,590	56,120	29,825	19,536	53,968	35,887	21,298
	63,763	37,724	20,606	55,435	31,109	21,594	52,784	34,938	18,536	67,417	36,907	22,205
	50,170	33,541	18,749	59,723	41,184	21,061	51,738	37,604	19,419	50,360	45,749	20,064
	46,073	29,086	16,928	69,872	37,071	20,060	43,235	38,651		64,008	36,117	19,018
	59,004			49,909			52,485			57,669		
	41,437									56,828		

## 2. Tabulka naměřených hodnot pevnosti spojů pájky Sn/Bi

pájka Sn/Bi (PF602 - P30)												
	0 cyklů						210 cyklů					
	DPS 1			DPS 2			DPS 3			DPS 4		
velikost součástek	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603
F [N]	85,150	62,296	43,122	59,299	58,104	33,740	50,329	23,556	14,520	50,694	27,945	26,357
	68,452	59,672	41,993	91,595	62,911	33,829	29,630	9,114	15,944	41,888	31,117	25,396
	87,871	53,260	42,224	83,454	60,218	38,153	19,544	19,866	17,792	38,406	21,563	18,263
	91,322	48,757	34,163	89,855	53,524	30,058	61,533	24,455	17,383	53,174	21,003	10,169
	72,826	60,233	34,981	81,687	56,174	29,743	30,090	26,419	16,644	54,334	24,875	14,072
	86,229	48,823	33,234	70,063	51,940	33,299	53,551	25,786	17,726	49,585	25,918	16,430
	76,414	63,257	44,359	77,107	51,956	38,938	34,272	34,385	21,104	40,211	24,384	15,570
	78,546	53,018	42,690	84,244	57,948	45,885	55,396	19,750	16,236	50,680	18,792	15,434
	90,077	50,793	37,347	85,077	55,964	31,903	53,750	27,840	19,236	31,856	25,489	20,345
	92,762	55,415	31,089	85,182	58,019	31,432	34,794	20,754	22,251	54,073	19,874	21,626
	64,190	56,329	34,133	80,476	56,030	40,254	51,376	31,525	17,925	54,302	26,937	17,209
	79,266	51,718	30,895	85,890	51,940	41,297	48,080	26,482	20,770	51,734	23,512	20,734
	85,310	56,357	35,981	81,842	51,742	36,592	37,876	30,389	18,170	35,479	18,329	21,784
	66,268	59,688	34,296	78,181	53,065	27,105	56,116	26,664	17,539	39,503	23,162	19,232
	82,275	46,044	42,212	79,839	56,088	36,336	44,025	21,909	17,733	24,451	26,393	17,959
	74,594	53,181	37,565	67,670	51,551	32,008	33,109	21,041	15,325	46,647	21,590	19,259
	82,738	47,465	33,436	65,510	57,583	29,592	26,844	31,051	17,364	39,176	27,969	17,057
	87,220	60,754	34,693	63,124	49,831	31,413	34,989	22,116	19,785	42,301	26,275	17,601
	90,611	61,132	34,207	80,092	57,723		36,939	27,560	26,011	52,341	29,143	15,881
	80,480	55,991	39,814				31,460	25,598	20,559	48,302	19,042	14,275
	87,698						30,148			46,508		
							27,852					
	400 cyklů						600 cyklů					
	DPS 5			DPS 6			DPS 7			DPS 8		
velikost součástek	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603
F [N]	44,507	20,831	18,839	40,304	22,500	21,049	23,147	13,718	14,422	32,277	27,599	15,738
	30,124	21,143	13,286	25,318	30,677	15,348	40,818	15,111	13,718	27,611	23,722	7,608
	28,922	16,515	15,325	51,473	18,372	18,220	30,930	18,095	15,718	38,655	21,765	11,706
	38,896	24,477	13,535	43,928	26,248	17,800	22,606	23,248	9,371	33,315	20,131	12,640
	37,004	22,003	18,271	48,045	13,694	12,597	0,210	19,236	13,815	15,313	19,746	15,535
	22,166	19,855	14,943	60,529	17,640	15,706	35,389	21,738	13,516	30,883	12,788	13,403
	40,814	20,675	16,041	41,807	20,345	16,134	23,704	22,672	12,418	37,109	17,454	15,738
	39,545	22,660	16,072	49,201	19,928	14,079	22,812	18,672	5,923	23,497	19,847	13,075
	37,441	21,859	17,733	42,869	22,898	15,192	25,054	19,653	13,118	33,058	22,139	13,375
	24,443	22,617	16,555	48,033	24,999	9,663	37,168	22,753	11,966	37,908	23,014	14,542
	42,390	23,396	14,659	36,690	18,765	16,138	19,208	17,255	13,710	25,824	19,831	11,169
	41,464	17,298	16,889	34,346	24,669	18,087	24,287	23,649	3,911	33,354	23,661	15,139
	35,292	17,850	15,372	41,472	20,135	13,659	32,186	23,657	12,850	23,291	32,564	12,270
	38,946	22,326	16,796	42,153	23,753	16,045	30,879	15,675	13,215	22,757	20,115	7,561
	20,831	25,786	16,278	33,145	24,069	16,718	25,303	18,477	14,469	35,506	22,446	14,453
	24,240	32,895	17,395	68,635	23,497	10,246	23,396	13,255	11,289	28,860	18,777	14,095
	37,686	22,625	16,068	53,808	20,539	14,278	24,564	19,407	12,173	29,895	19,200	13,407
	39,834	31,421	15,376	50,325	26,513		22,287	14,150	14,352	30,802	19,679	18,543
	44,912	29,358	19,111	50,189	36,763		21,537	22,633	0,163	32,366	16,606	10,301
	48,652	24,528	15,457	36,763	26,513		17,605	18,574	9,286	36,880	21,256	11,815
	36,744			50,189	22,069		25,579			27,793		
	42,325			32,249						34,460		

### 3. Tabulka naměřených hodnot pevnosti spojů pájky Sn/Bi/Ag

pájka Sn/Bi/Ag (NC273 LT)												
	0 cyklů						210 cyklů					
	DPS 1			DPS 2			DPS 3			DPS 4		
velikost součástek	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603
F [N]	54,734	59,261	37,475	81,629	50,874	45,255	39,238	21,936	17,458	42,628	30,300	18,115
	92,859	52,796	25,957	49,706	50,186	36,316	29,529	24,532	16,865	25,937	17,278	17,251
	92,335	50,925	32,922	81,636	51,197	41,623	50,963	24,311	14,445	39,335	18,582	16,197
	94,272	48,379	26,606	74,503	58,295	35,697	28,762	27,531	14,531	22,365	24,034	19,193
	67,024	53,735	31,229	97,355	58,852	39,713	37,817	21,622	15,236	35,253	25,264	10,908
	93,400	56,159	33,404	63,537	60,412	36,728	35,324	23,065	17,391	32,985	20,777	27,354
	68,856	51,835	26,700	83,287	57,288	29,572	24,999	22,014	16,663	26,680	23,840	15,944
	72,304	54,415	26,688	82,279	51,667	36,791	20,574	27,303	18,142	47,002	21,808	0,307
	91,572	51,758	30,354	67,245	62,642	37,320	26,314	7,639	19,384	48,290	25,661	27,984
	75,452	41,172	38,448	87,034	41,277	35,448	25,139	9,544	12,087	37,600	17,901	13,527
	75,189	48,978	25,583	53,516	58,411	37,837	34,875	24,264	23,971	41,698	25,649	8,666
	56,190	51,291	27,583	78,216	62,498	37,343	37,471	20,991	15,924	30,187	26,466	8,118
	74,437	58,875	35,269	56,443	56,236	36,117	30,268	29,194	17,956	28,155	21,746	15,173
	76,644	59,206	33,246	78,722	52,244	22,380	32,117	27,089	15,017	45,862	20,948	14,648
	74,465	45,348	26,431	66,397	54,551	34,608	23,680	24,268	23,828	28,591	21,812	14,886
	61,451	47,975	29,790	82,457	51,683	22,789	33,892	30,051	13,247	36,409	21,298	17,804
	84,224	55,657	36,300	85,672	46,971	25,634	35,355	22,956	14,761	23,995	23,334	15,636
	86,279	57,112	20,711	49,348	46,900	18,294	41,989	22,956	19,598	32,382	17,255	14,328
	84,282	48,181	32,378	77,286	58,334	39,954	23,933	23,832	14,138	34,385	23,708	17,282
	53,535	54,330	28,439	85,330	54,599	30,307	32,801	22,617		29,346	21,423	8,020
	61,719			55,540			37,320			26,704		
	87,789									24,855		
	400 cyklů						600 cyklů					
	DPS 5			DPS 6			DPS 7			DPS 8		
velikost součástek	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603	1206	0805	0603
F [N]	28,995	28,311	15,473	30,459	19,341	15,550	18,579	14,488	10,133	15,033	0,113	6,507
	42,414	22,154	17,769	28,370	21,154	15,644	16,367	11,717	7,853	8,161	7,347	0,245
	28,607	28,070	15,601	25,630	20,196	16,056	17,466	2,825	4,923	23,882	17,909	6,149
	33,412	21,399	15,916	34,934	21,489	14,087	15,734	15,418	4,608	9,044	4,277	5,686
	43,418	23,299	10,834	25,096	19,672	9,939	14,418	9,215	5,604	21,984	6,752	6,565
	39,094	31,731	20,368	26,907	20,820	46,048	14,433	5,767	5,654	34,027	21,084	13,360
	27,914	29,544	15,698	26,668	18,524	12,017	15,854	10,394	6,304	28,743	16,500	11,305
	30,946	25,801	16,096	28,256	11,982	11,896	18,929	0,101	4,230	31,312	26,676	13,095
	29,525	25,984	10,698	13,192	14,904	17,777	8,678	14,103	5,678	21,411	5,553	13,316
	21,715	21,341	15,196	21,804	21,575	13,367	3,989	0,914	4,790	17,217	12,399	6,491
	35,798	20,766	14,449	25,786	8,052	14,702	15,224	11,488	2,498	21,867	12,780	12,982
	31,393	23,843	32,144	25,926	21,936	12,231	13,379	8,651	7,417	26,805	18,061	14,819
	25,450	26,136	15,764	17,796	19,115	13,807	24,236	13,955	5,405	24,112	23,006	14,271
	32,751	21,715	14,414	30,361	20,847	14,165	16,590	22,251	11,426	31,350	26,606	14,445
	29,011	20,485	16,243	20,317	21,120	10,344	21,543	20,325	13,407	21,029	21,162	12,207
	42,285	25,859	16,271	36,852	8,803	9,091	30,401	18,006	5,265	34,214	6,211	6,223
	57,306	17,773	8,044	23,777	16,029	7,904	21,567	21,112	10,639	14,500	6,024	8,807
	46,216	26,478	8,468	29,513	21,594	7,141	20,018	17,889	12,920	15,329	12,294	7,647
	37,526	24,594	20,734	27,902	21,057	2,382	24,780	15,904	7,670	15,406	12,134	9,667
	40,281	17,905	9,067	53,723	13,935		39,697	21,395	14,091	13,091	11,266	6,503
	36,736			24,330			22,423			18,959		
										16,780		

## 4. Tabulka naměřených hodnot rezistivity jednotlivých substrátů

pájka	SAC305 (PF606 - P30)				Sn/Bi (PF602 - P30)				Sn/Bi/Ag (NC273 LT)			
počet cyklů	0	210	400	600	0	210	400	600	0	210	400	600
číslo substrátu	R [Ω]				R [Ω]				R [Ω]			
1	-	-	-	-	4,452	-	-	-	4,618	-	-	-
2	4,164	-			-	-			4,629	-		
3	4,204	4,163			4,499	4,760			4,607	4,943		
4	4,153	4,111			4,486	4,794			4,494	4,815		
5	4,205	4,160	4,158		4,464	4,784	4,869		4,517	4,861	4,848	
6	4,122	4,076	4,083		4,431	4,687	5,037		4,575	4,897	4,897	
7	4,165	4,126	-	4,132	4,433	4,765	-	5,224	4,537	5,410	-	5,423
8	4,148	4,104		4,106	4,441	4,757		5,123	4,502	5,358		5,394
9	4,173	4,130		4,142	4,444	5,423		9,898	4,570	5,521		5,548
10	4,274	4,285		4,925	4,461	5,186		170,410	4,570	4,927		4,957
11	-	-		-	-	-		-	4,459	4,813		4,826

## 5. Tabulky množství nanesené pájecí pasty

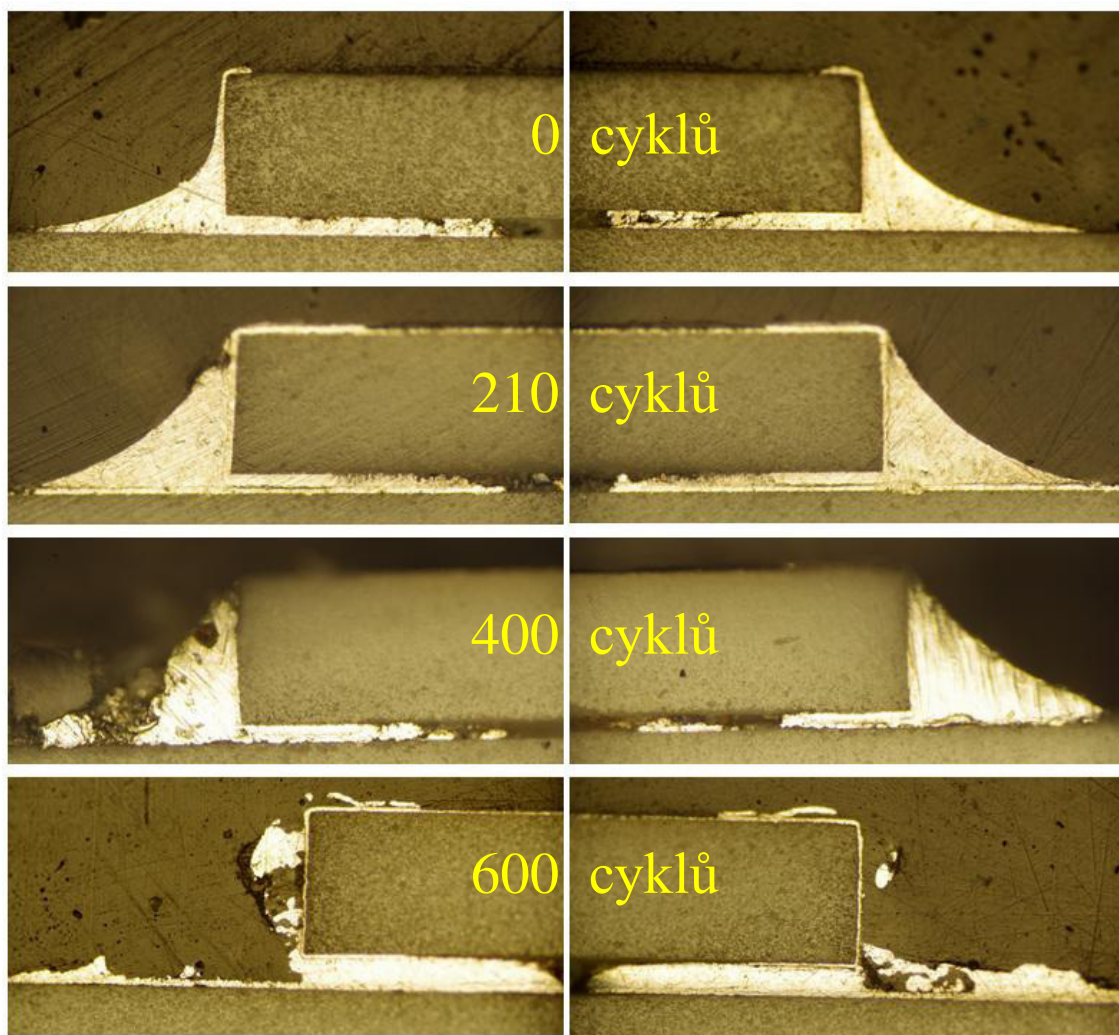
Pájecí pasta SAC 305			
pořadové číslo destičky	Hmotnost testované destičky		hmotnost pájecí pasty [g]
	bez pájecí pasty	s pájecí pastou	
	[g]	[g]	
1	5,41640	5,59300	0,17660
2	5,93896	6,10913	0,17017
3	5,90330	6,08449	0,18119
4	5,88455	6,06281	0,17826
5	5,92833	6,10857	0,18024
6	5,80068	5,98829	0,18761
7	5,89982	6,08561	0,18579
8	5,95228	6,14750	0,19522
9	5,93712	6,11564	0,17852
10	5,86649	6,05597	0,18948

Pájecí pasta Sn/Bi			
pořadové číslo destičky	Hmotnost testované destičky		hmotnost pájecí pasty [g]
	bez pájecí pasty	s pájecí pastou	
	[g]	[g]	
1	5,90825	6,03141	0,12316
2	5,85546	6,03162	0,17616
3	5,94336	6,12273	0,17937
4	5,88868	6,10310	0,21442
5	5,85225	6,07399	0,22174
6	5,82087	6,05251	0,23164
7	5,85496	6,08629	0,23133
8	5,78247	6,01022	0,22775
9	5,81980	6,04993	0,23013
10	5,94210	6,17017	0,22807

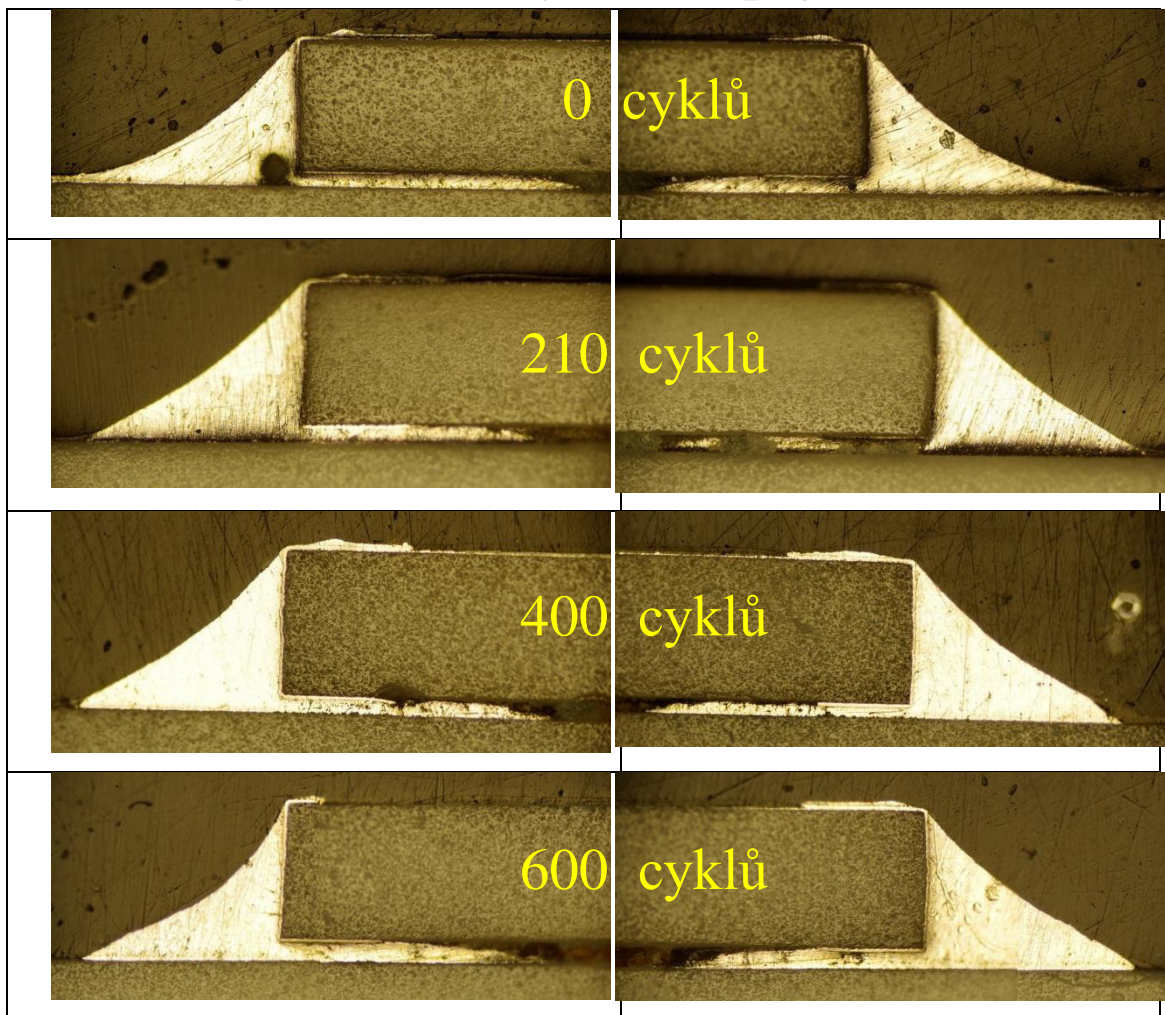
Pájecí pasta Sn/Bi/Ag			
pořadové číslo destičky	Hmotnost testované destičky		hmotnost pájecí pasty
	bez pájecí pasty	s pájecí pastou	
	[g]	[g]	
1	5,93455	6,07320	0,13865
2	5,88373	6,04192	0,15819
3	5,89605	6,05646	0,16041
4	5,87058	6,03214	0,16156
5	5,90387	6,07448	0,17061
6	5,81261	5,97502	0,16241
7	5,92142	6,10234	0,18092
8	5,86646	6,04898	0,18252
9	5,82902	6,01179	0,18277
10	5,92238	6,10395	0,18157
11	5,81386	6,00150	0,18764



## 6. Fotografie mikrovýbrusů - pájka Sn/Bi/Ag

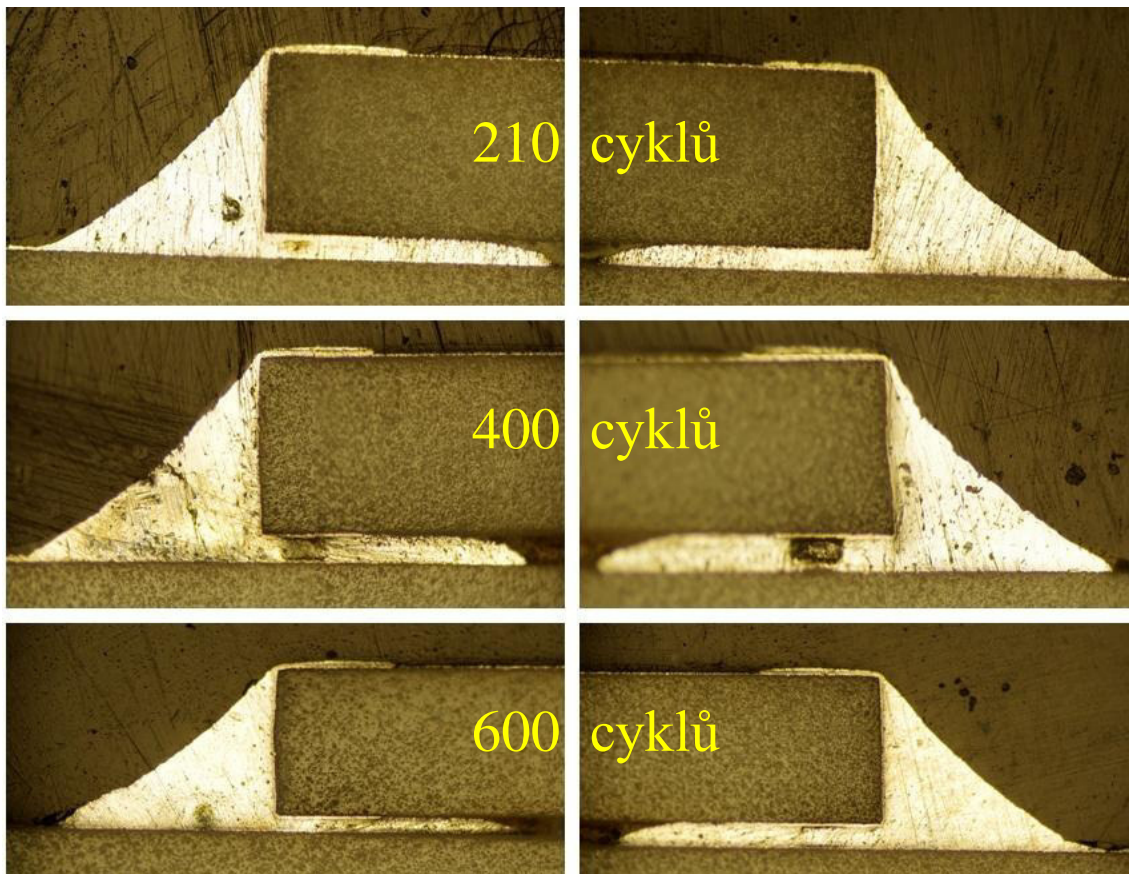


## 7. Fotografie mikrovýbrusů - pájka Sn/Bi

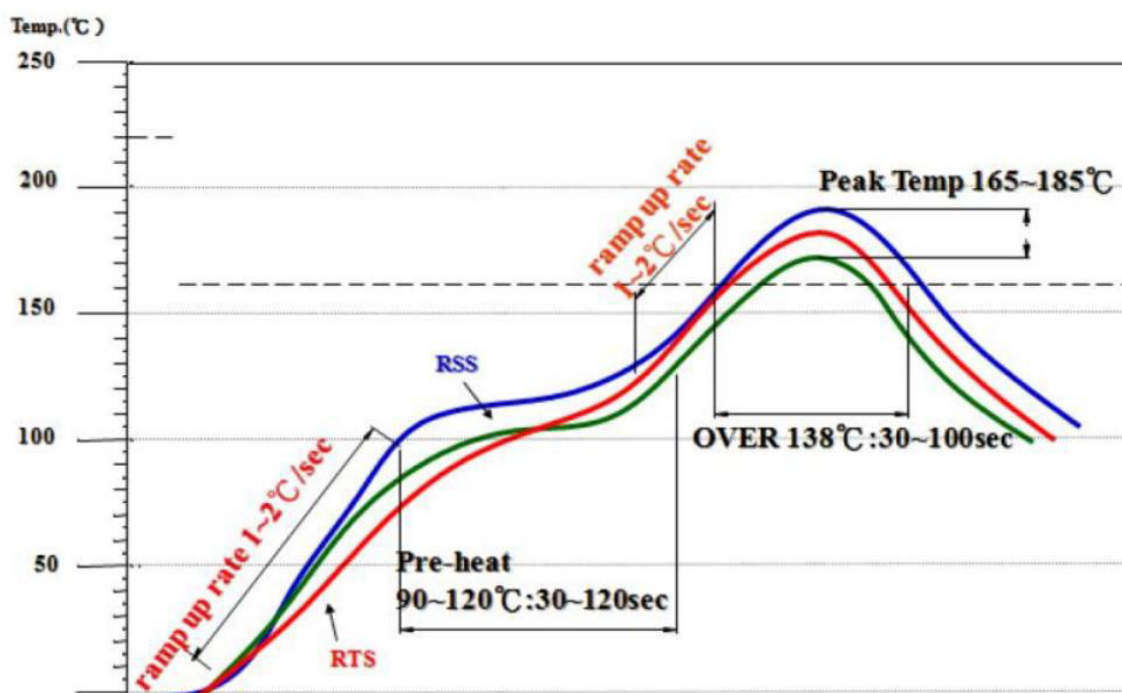




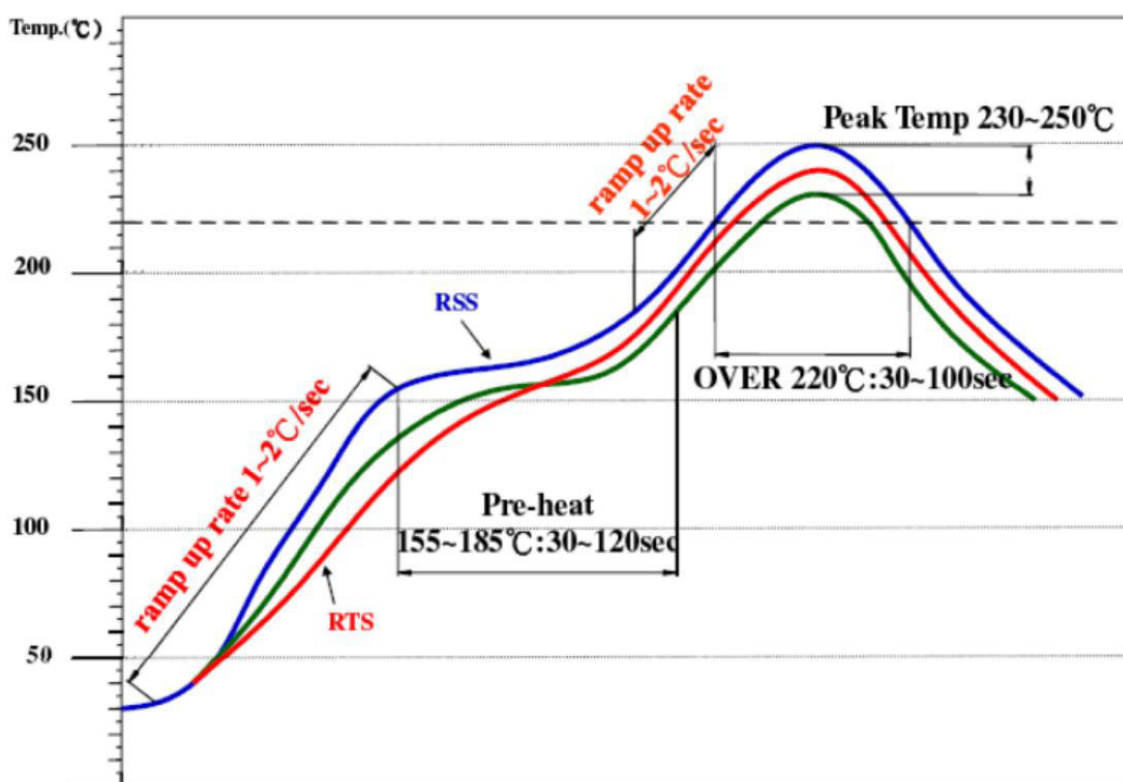
## 8. Fotografie mikrovýbrusů - pájka SAC



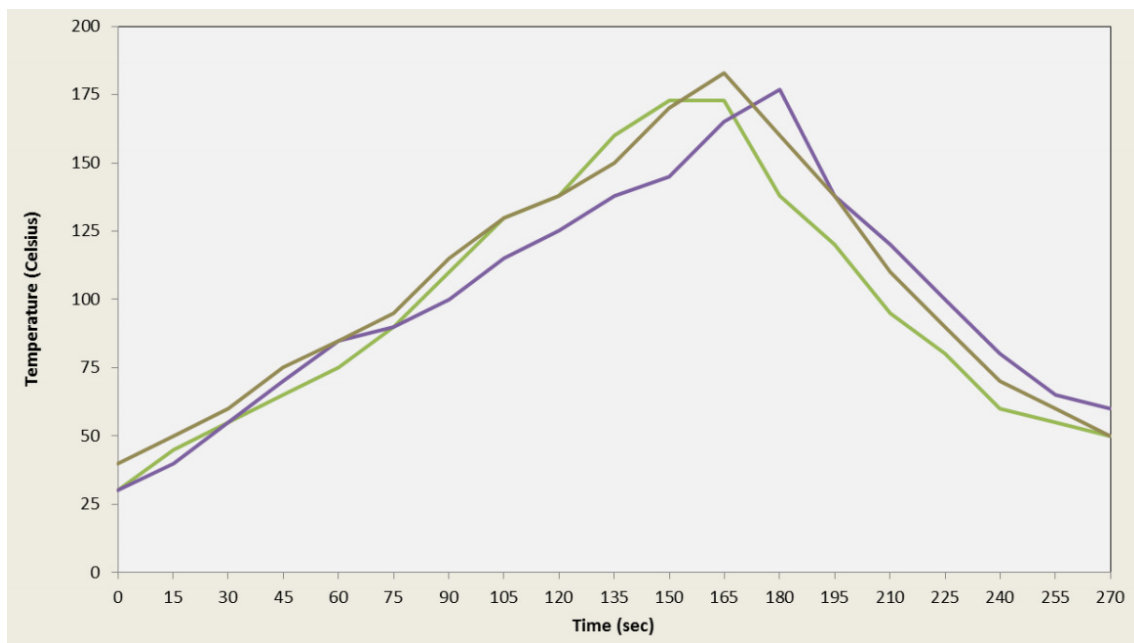
## 9. Výrobci doporučené profily pro přetavení pájecích past



Doporučený přetavovací profil pájky Sn/Bi (PF602-P30)



Doporučený přetavovací profil pájky SAC305 (PF606-P30)



Doporučený přetavovací profil pájky Sn/Bi/Ag ( NC273 LT)